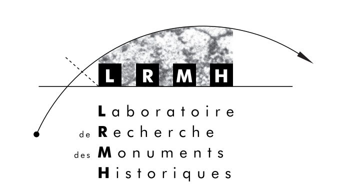








Laboratoire de recherche des monuments historiques 2013

Bilan scientifique 2014

Mammouth sculpté - Grotte du Mammouth, Domme, Dordogne

Laboratoire de recherche des monuments historiques

BILAN SCIENTIFIQUE

2012
2014





1 INTRODUCTION

1.1 Présentation générale

1.1.1 Orientations stratégiques

Ces dernières années ont été marquées par une activité de réflexion intense sur les missions du laboratoire, à la fois dans le domaine de la recherche et dans celui du service et de la contribution au contrôle scientifique et technique de l'État sur les restaurations de monuments historiques.

Nous avons renforcé de manière importante notre activité de recherche, en nous positionnant de manière plus claire dans le paysage de la recherche française, dite « académique ». C'est ainsi que nous nous sommes insérés dans le contrat quinquennal du Centre de recherche sur la conservation (CRC-USR 3224) au 1er janvier 2014, à la suite du rapport d'évaluation très positif de l'AERES (A et A+).

Par ailleurs, afin de nous ancrer davantage dans notre environnement scientifique de proximité et afin de donner une meilleure lisibilité à nos partenariats scientifiques actuels, nous avons signé une convention d'association avec la Communauté d'universités et d'établissements de Paris-Est. Nous y rejoignons 4 autres services dépendant du ministère de la Culture et de la Communication (Écoles d'architecture de Marne-la-Vallée, de Paris-Belleville et de Paris-Malaquais, ainsi que l'Institut national de l'audiovisuel). Nous participons déjà pleinement aux instances de gouvernance de la COMUE et collaborons au projet de contrat de site.

Notre contribution aux LabEx Matisse, Patrima et au DIM OxyMore (Domaine d'intérêt majeur de la région Île-de-France), nous a permis, non seulement de nous impliquer dans la définition des orientations stratégique et des appels à projets, mais aussi de bénéficier de soutiens financiers divers, pour des thèses de doctorat, des bourses de master, ou encore pour des équipements. L'EquipEx Patrimex a pris son essor, et nous avons lancé l'acquisition du matériel pour le couplage LIBS-LIF-RAMAN et acheté la camionnette du laboratoire mobile, qui a commencé à se déplacer sur site, en particulier à la cathédrale d'Albi, dans le cadre de la restauration du chœur des chanoines.

Dans le domaine du service, nous avons tenté de clarifier notre rôle dans le cadre du contrôle scientifique et technique de l'État. Ce positionnement, nouveau par rapport aux pratiques anciennes, où nous intervenions sur tous sites protégés, quel que soit le maître d'ouvrage, a été encadré par la circulaire de 2009 sur le CST, mais a demandé de nombreux ajustements. Ceux-ci ont été facilités par le dialogue systématique établi par Stéphanie Celle, adjointe au directeur, avec les conservations régionales des monuments historiques, à l'occasion de son « tour de France ». En interne a été mené également un travail de réflexion avec les pôles scientifiques, à l'occasion des réunions trimestrielles, afin de mieux répondre aux attentes de nos interlocuteurs, en établissant une sorte de hiérarchisation de la demande, depuis les analyses ponctuelles pour le compte des services de l'État jusqu'aux études scientifiques complètes, en passant par l'aide au diagnostic et à la définition de protocoles d'études pour les maîtres ouvrages autres que l'État.

a) Les projets de recherche

Depuis plusieurs années, nous organisons nos travaux selon trois grandes thématiques : la thématique 1 porte sur la connaissance des matériaux et de leurs altérations dans le temps, la thématique 2 sur les méthodes de conservation-restauration, la thématique 3 sur l'optimisation des techniques d'analyse et d'essai. Nous y avons ajouté cette année une quatrième thématique sur le traitement des données et la documentation.

Dans le domaine de la connaissance des matériaux et de leurs altération (**thématique 1**), il faut faire état des différents travaux menés sur les apports des mesures isotopiques à la compréhension des mécanismes d'altération des œuvres, qui sont à la base de trois projets, comme celui qui porte sur l'origine des dépôts minéraux dans les grottes ornées (en collaboration avec l'université Jean Monnet de Saint-Étienne, p. 93), celui qui a été réalisé sur l'altération des verres et des pierres calcaires dans le cadre du projet CAVIAR (PNRCC, p. 67), ou encore sur la provenance des albâtres gypseux conservés dans les collections publiques françaises (AAP Patrima, p 75).

Dans le cadre de la **thématique 2** (conservation-restauration des biens culturels), qui est véritablement au cœur de nos activités, de nombreuses recherches ont été menées à terme ou lancées, comme la thèse soutenue par Fabien Borderie sur l'utilisation du rayonnement UV-C pour l'éradication des organismes chlorophylliens dans les grottes ornées (en partenariat avec l'université de Franche-Comté, p . 110), ou le projet européen Nanomatch sur la mise au point de produits nano-structurés pour la consolidation des pierres, des mortiers, des peintures murales, du bois et du verre (p . 114).

La **thématique 3** (mise au point et optimisation de techniques d'analyse et de diagnostic) a pris de l'ampleur ces dernières années, notamment grâce au soutien de

l'EquipEx PatrimEx. Les recherches, déjà largement engagées, sur l'application des techniques LIBS (spectroscopie sur plasma induit par laser) à la caractérisation des matériaux du patrimoine se développent dans le cadre de la thèse de Delphine Syvilay sur l'évaluation des techniques LIBS-LIF-RAMAN pour l'analyse des matériaux du patrimoine, qui s'appuie sur les nouveaux équipements financés par l'EquipEx. Il faut également mentionner les travaux réalisés depuis plusieurs années par le pôle Béton sur les techniques de suivi de la corrosion des armatures métalliques dans le béton, avec en particulier l'utilisation de capteurs noyés (projet DIM OxyMore CANOPEE et Opération de recherche stratégique APOS, p. 99) Le projet européen CHARISMA a permis quant à lui, de faire une synthèse des méthodes de caractérisation employées sur site et de rédiger un guide de bonnes pratiques, appuyé sur des essais comparatifs menés *in situ* à la chapelle Notre-Dame de Chaalis.

Le projet PARCOURS (AAP Patrima, p. 132**), thématique 4** (traitement des données et documentation) est un projet original, qui rassemble, pour la première fois, les équipes de documentation du C2RMF, du CRC et du LRMH – en y associant le laboratoire ETIS, université de Cergy-Pontoise - autour de la mise au point d'un système de référence commun pour l'interrogation et l'exploitation de sources d'information différentes et parfois incompatibles. Il comprend l'élaboration d'une ontologie pour les données de conservation – restauration, afin de permettre l'interopérabilité des différents systèmes de gestion documentaire.

b) Les études scientifiques

L'activité d'étude scientifique sur site et de contribution au contrôle scientifique et technique de l'État, s'est développée et transformée au cours des dernières années. En effet, les réformes de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre de la restauration de monuments historiques ont conduit les conservations régionales des monuments historiques à nous solliciter en amont, au niveau de « porté à connaissance » afin que nous les aidions à mettre au point des protocoles de diagnostic scientifique qui sont ensuite intégrés dans les projets, ou nous demandent notre expertise technique dans l'analyse de projets de restauration. Sur les monuments n'appartenant pas à l'État notre intervention est ainsi plus indirecte, mais associe toujours des visites de terrain et l'analyse de dossiers, notamment de dossiers d'études scientifiques établis par des laboratoires de service, en amont et en aval. Cette activité, qui n'est pas nouvelle mais qui devient plus systématique, est liée à une certaine perte de technicité au niveau de la maîtrise d'œuvre, souvent constatée par les CRMH, à la suite de l'ouverture de la maîtrise d'œuvre à des architectes du patrimoine parfois peu expérimentés. Elle est preneuse de temps et source aussi d'une certaine frustration de scientifiques qui, craignant de devenir des experts techniques de la conservation plus que des chercheurs, regrettent d'avoir moins l'occasion de mettre en œuvre leurs spécialités analytiques. Il s'agira dans l'avenir d'ajuster notre positionnement et de mettre en œuvre plus souvent un pré-diagnostic analytique de terrain, rendu plus aisé par la plate-forme mobile, le « camion-laboratoire » de PatrimEx, afin de mieux définir les protocoles d'études scientifiques. On renforcerait ainsi même la spécificité du rôle de l'État, dans l'excellence scientifique, dans l'assistance aux services déconcentrés et en dehors du champ concurrentiel.

On compte donc, pour la période, 72 rapports d'études, et 155 notes scientifiques soit une moyenne d'environ 36 rapports par an et 77 notes, ce qui montre une augmentation du nombre de rapports, interventions longues, et une diminution du nombre de notes, interventions plus ponctuelles. En complément, un certain nombre de demandes trouve des réponses de conseil sous forme de courriers électroniques, et ce type d'activité mériterait d'être mieux pris en compte à l'avenir.

Parmi les études menées au cours du biennium, mentionnons le gros travail réalisé par les pôles Béton, Pierre et Peintures murales dans le cadre des travaux de restauration des maisons La Roche-Jeanneret de Le Corbusier, menés par Pierre-Antoine Gatier, architecte en chef des monuments historiques p. 30, l'étude très complète des matériaux de la colonne Vendôme à Paris, ainsi que l'important travail engagé dans le suivi de l'état biologique des cavités ornées, mené par les pôles Microbiologie et Grottes ornées, qui vise à mettre en place des seuils de référence pour une évaluation future de l'état sanitaire de ces milieux fragiles (p. 34 et 42). On citera également une orientation nouvelle prise par le pôle Pierre qui développe une activité sur la conservation de la terre crue et a mis son expertise au service de la consolidation de coupes stratigraphiques archéologiques sur le site de Glux-en-Glenne (Nièvre, p. 50)

1.1.2 Évaluation

Les projets de recherche en cours et achevés ont donné lieu, sur les 2 années, à 139 publications (rapports non compris), dont 14 (soit en moyenne environ 7 par an) dans des revues dites de rang A, pour 20 auteurs (IR, IE et AI). Si l'on considère que chaque chercheur ne consacre que 50 % au maximum de son temps à la recherche, le reste étant consacré aux études scientifiques, on doit compter un nombre total de productions scientifiques de 209 sur 2 ans, soit une moyenne d'une centaine par an. Ceci correspond à une moyenne totale de 5 « publications » par auteur et par an (sur 20 auteurs), sans compter les notes d'intervention rapide.

Il faut noter cependant que ce mode d'évaluation chiffrée est en partie biaisé par la variabilité du rythme des projets, des manifestations scientifiques et des études de terrain, elles-mêmes liées aux travaux de restauration. Il y a ainsi des années plus riches que d'autres lorsqu'elles correspondent à l'achèvement d'une ou plusieurs thèses ou de projets de recherche, ou qu'elles ont vu s'organiser de nombreux colloques sur des thématiques proches des nôtres, qui ont suscité des publications.

	2010	2011	2012	2013	2014
Nombre total de publications	49	54	74	82	57
Dont de rang A	8	7	14	7	7
Nombre d'études	33	21	29	52	18
Total	**82**	**75**	**103**	**132**	**75**

1.1.3 Le développement de la recherche universitaire et la formation à la recherche

Sur les deux années écoulées nous avons co-encadré 11 sujets de thèse, dont 5 ont été soutenues à ce jour. Les sources de financement sont diverses, budget propre du LRMH (à 50 %), LabEx Patrima et Matisse. Les LabEx ont à l'évidence renforcé nos liens avec les universités Pierre et Marie Curie (UPMC) et de Cergy-Pontoise, mais nous avons poursuivi nos partenariats avec les universités de Reims, de Poitiers, de Franche-Comté, de Bordeaux I (laboratoire US2B) et III (master de géologie), de Paris I (maîtrise de sciences et techniques en conservation-restauration des biens culturels) et avec l'université Paris Est (UPE - master Matériaux du patrimoine dans l'environnement et UPEM - laboratoire des géomatériaux), avec lesquelles nous avons des échanges de chercheurs, des participations à l'enseignement, des conventions de recherche.

Notre insertion dans le CRC nous a également donné accès à des sources de financement complémentaires dans le cadre des appels à projet « Convergences » de l'IdEx SUPER (COMUE Sorbonne-Universités), sur une thématique fléchée sur le patrimoine. Nous y avons obtenu le soutien de 3 projets sur la caractérisation des vitraux par des méthodes spectroscopiques, en partenariat avec UPMC et le Centre André Chastel (Vitraux), sur l'analyse de la provenance des albâtres gypseux, avec UPMC (Albatrée), et sur l'altération des collections de paléobotanique avec l'équipe CRCC (Acopal). Ces projets ne faisant que commencer ils ne sont pas décrits dans le présent bilan.

1.1.4 L'emploi scientifique

En 2013 nous avons eu l'opportunité de recruter 3 scientifiques sur contrats, en remplacement d'agents partis à la retraite ou en mutation : deux ingénieurs de recherche (pôle Microbiologie, projet Patrimex), un ingénieur d'études (pôle Métal). Ces contrats correspondant à des emplois permanents, ils devront être reconduits, dans l'attente de l'ouverture de concours de recherche, sans doute fin 2015 et 2016. Par ailleurs, le Cercle des partenaires du patrimoine a fait travailler 10 jeunes chercheurs sur des contrats de mission, mais qui sont soumis aux aléas des appels à projets et que, malheureusement, nous ne pouvons pas toujours stabiliser malgré leurs compétences.

1.1.5 Le partenariat entre recherche publique, innovation et recherche en entreprise

Dans ce domaine le LRMH a établi un partenariat très actif avec le monde industriel, depuis 1993, par le biais du Cercle des partenaires du patrimoine, association destinée à recueillir des fonds du mécénat privé et à monter des programmes de recherche avec de grands groupes industriels. En fonction de l'achèvement de projets pluriannuels en 2012, nous n'avons plus qu'un projet industriel actif sur 2013-2014. Cependant, l'arrivée de nouveaux adhérents nous ouvre la perspective de nouveaux projets, à compter de 2015, notamment sur la connaissance et la conservation des façades en plâtre à Paris.

1.1.6 La construction de l'espace européen de la recherche et les relations internationales

En 2014 les projets CHARISMA et NANOMATCH se sont achevés. Leurs résultats ont été valorisés à travers l'organisation de colloques et d'ateliers de démonstrations. La conférence finale de CHARISMA a eu lieu à Florence à l'Opificio delle pietre dure (Fig. 1), du 4 au 6 mars 2014. Elle a rassemblé une assistance nombreuse et permis des démonstrations de techniques développées dans le cadre du projet, comme la technique d'imagerie térahertz, mise au point par le C2RMF, puis le LRMH. Les résultats ont été présentés aux professionnels du Patrimoine, au cours de divers ateliers organisés à Cologne, Bucarest et Champs-sur-Marne. La conférence finale a eu lieu au musée Correr à Venise du 16 au 17 octobre 2014.

Il faut noter ici que nous avons été, depuis 20 ans, partenaires de 13 projets européens, pour un montant total de 1,5 millions d'euros. Nous avons passé beaucoup de temps pendant l'été 2014 à la préparation du projet IPERION-CH, coordonné par Luca Pezzati, du CNR (Laboratoire INOA à Florence), qui prend la suite de CHARISMA, et dans lequel nous sommes responsables d'un « work package » spécifique destiné à la préparation d'une plate-forme européenne de recherche sur les matériaux du patrimoine et qui rassemblerait le réseau de laboratoires et de grands instruments réunis dans le cadre des projets précédents EuArtech et CHARISMA.

Dans un cadre plus international, le LRMH est souvent sollicité pour des expertises ou pour participer à des conseils scientifiques sur des sites prestigieux, comme la grotte d'Altamira en Espagne, ou sur des sites rupestres en Amérique centrale. Le directeur du LRMH est depuis plusieurs années président, *intuitu personae*, du Comité scientifique international pour la conservation des vitraux. Le pôle Pierre participe aussi aux activités du Comité scientifique international pour la pierre de l'ICOMOS, qu'il a contribué à reconstituer.



Figure 1 : Florence, Opificio delle pietre dure, démonstration de l'imagerie térahertz, dans le cadre de la conférence finale de CHARISMA.

1.1.7 L'information et la culture scientifique et technique

Outre ses publications scientifiques, le LRMH diffuse régulièrement les résultats de ses études et recherches par l'intermédiaire des nombreuses formations qu'il assure pour les différents acteurs de la conservation du patrimoine, ainsi que par son site ou encore par l'organisation de colloques, souvent en collaboration avec ICOMOS-France. On peut mentionner le colloque « Métal à ciel ouvert » organisé par le pôle Métal, en partenariat avec ICOMOS-France et la SFIIC, à l'auditorium Colbert, du 4 au 6 décembre 2014.

La diffusion de nos résultats et de l'avancée des connaissances dans le domaine de la conservation des matériaux du patrimoine passe aussi par l'édition de notre Lettre d'information électronique, lancée en 2013 et coordonnée par Stéphanie Celle, adjointe au directeur. Quatre numéros sont sortis, « LRMH mode d'emploi », « Pratiques et recherche sur le bois dans le patrimoine culturel », « Nouvelles technologies analytiques appliquées à la problématique des peintures murales », « Conservation et restauration des pierres des monuments : approfondissement des connaissances et exploration de nouveaux champs ». Cette Lettre, largement diffusée auprès de nos interlocuteurs, services déconcentrés, professionnels du patrimoine, partenaires scientifiques, connait un franc succès et nous sommes encouragés à poursuivre dans cette voie.

La consultation de notre site web et de nos bases documentaires montre une légère augmentation (+ 9 %, soit 431 508 visites en 2 ans), bien que le nouveau site ne soit pas encore ouvert au public. La consultation des bases de données documentaires représente en moyenne 50 % des visites.

1.1.8 Administration et locaux

En octobre 2013, a été signée par le ministère de la Culture et de la Communication et le Centre des monuments nationaux, une convention de mise à disposition, en plusieurs étapes, de l'ensemble des locaux

formant les communs ouest du château de Champs-sur-Marne au profit du LRMH. En synthèse, la convention vise, sur le long terme, une affectation de l'ensemble des communs ouest au LRMH hormis le pavillon situé à l'entrée du site et occupé par l'antenne local du STAP de Seine-et-Marne. Cette finalité de stabilisation et d'extension, a été renforcée par l'abandon officiel en 2013 du projet de Cergy qui prévoyait le déménagement du LRMH pour le fondre avec d'autres laboratoires en une unique unité de service et de recherche. Ce nouveau contexte a conduit la direction du laboratoire à défendre une stratégie de redéploiement des activités du laboratoire en son site afin d'optimiser l'utilisation des espaces et de favoriser le développement de ses missions scientifiques.

Mais en parallèle d'une réflexion orientée sur le long terme, l'engagement pris en 2012 dans le cadre du programme ambitieux de l'EquipEx Patrimex, a aussi obligé la direction du laboratoire à définir comme prioritaire l'aménagement d'un laboratoire d'optique pour le développement des instruments d'analyse *in situ* qui accompagnent le projet de laboratoire mobile constituant l'une des trois plates-formes instrumentales de l'EquipEx. Le seul scenario possible a été d'imaginer de créer ce laboratoire en lieu et place des archives du CMN, évacuées à cet effet de la salle dite de « l'ancienne remise aux voitures ».

Pour mener à bien ce projet d'aménagement, une convention ayant pour objet une mission de maîtrise d'ouvrage, a été signée en octobre 2013 par la DGP et le CMN et une enveloppe de 200 000 euros a été spécifiquement déléguée à l'établissement public. Une équipe de maîtrise d'œuvre a été sélectionnée à la suite d'une consultation et celle-ci a rendu un avant-projet sommaire en juin 2014. Si d'un point de vue spatial, cet avant-projet donne satisfaction, son estimation financière de 600 000 euros, est jugée irrecevable bloquant la procédure d'étude. Ce surcoût provient d'abord, de la solution proposée par l'architecte pour répondre au problème de contrainte admissible du sol. En effet, les sondages préalables ont décelé un sol constitué de remblais ne permettant pas de prendre appui sur la structure existante et obligeant à concevoir une « boîte dans la boîte » supportée par des fondations autonomes et semi-profondes. Cette analyse « maximaliste » a été contestée à juste titre par Jacques Moulin, architecte en chef compétent sur le site, qui a suggéré de faire des sondages complémentaires et d'élargir l'assiette expertisée ainsi que d'adopter une approche prenant mieux en considération les qualités constructives du bâtiment du XIX[e] siècle. Nous sommes à ce jour en attente des résultats.

La mise en route du projet de laboratoire d'optique impliquait en outre le déménagement d'une partie du dépôt de vitraux, présent depuis la dernière guerre, dans l'ancienne remise aux voitures. La gestion de ce dépôt, avait été conférée au CMN depuis une vingtaine d'années. Celui-ci n'a plus souhaité l'assurer, considérant qu'elle relevait des missions de l'État. La direction générale des Patrimoines a donc chargé la direction du LRMH de l'administration de ce dépôt, ce qui devrait simplifier les opérations de réorganisation prévues. Un premier récolement de l'inventaire, accompagné d'un dépoussiérage et de prises de vues a été réalisé en 2014.

D'une manière plus générale, une réflexion doit être menée sur l'occupation des locaux par le LRMH, qui est installé dans les communs ouest du château depuis 1970. L'organisation actuelle du laboratoire résulte d'un processus d'aménagement au coup par coup lié aux opportunités offertes par des vacances d'espace et aux réponses données au fur et à mesure aux besoins de fonctionnement les plus urgents. Mais ce processus touche ses limites et différents problèmes d'organisation ne pourront être dénoués sans une vision globale et prospective afin de faire les bons choix pour améliorer l'ensemble sans tout remettre en cause. C'est ainsi qu'à la demande exprimée en 2013 par la direction du LRMH, de mener une étude de programmation pour concevoir un schéma directeur, la direction générale des Patrimoines a répondu favorablement en 2014, en lui déléguant une somme de 50 000 euros. Cette étude sera lancée début 2015, après qu'un travail de concertation en interne, avec le ministère et le CMN également, aura permis de réaliser un cahier des charges décrivant l'expression des besoins.

1.1.9 Perspectives pour 2015

En ce qui concerne nos missions de service, nous avons lancé en 2013 une réflexion collégiale sur la refonte de notre outil de saisine du LRMH, qui passait par une fiche demandeur sous format papier ou informatique, fiche qui était versée manuellement sur une base de données « maison ». Le groupe de travail constitué à cet effet est en train de préparer le cahier des charges du nouvel outil de saisine dénommé ODIL (Outil de demande d'intervention du laboratoire). Cet outil doit permettre de répondre aux missions d'information et de contrôle scientifique et technique du LRMH tant sur les monuments ou objets - classés ou inscrits - que sur les objets de musée ou les archives. Pour répondre aux objectifs fixés, il est prévu de créer un guichet internet pour saisir en ligne les demandes

d'intervention du laboratoire. Ce guichet permettra non seulement de fluidifier le circuit des demandes mais aussi qu'elles soient toutes prises en compte dans les tableaux d'activité. Les travaux du groupe ont d'ores-et-déjà permis d'établir le circuit de la demande d'intervention, de proposer un modèle de guichet internet, de définir la liste des champs de la base et de proposer un certain nombre de requêtes et de formulaires utilisant des champs pré-remplis. Un cahier des charges est en cours de rédaction pour un appel d'offres qui sera lancé début 2015.

L'année 2015 sera une année riche de projets de recherche, pour certains déjà lancés, pour d'autres encore en cours d'évaluation. C'est ainsi que nous encadrerons 4 nouvelles thèses : deux seront portées par un co-financement LRMH, l'une sur l'impact du rayonnement UVC pour l'éradication de micro-organismes (Université de Franche-Comté, suite de la thèse de Fabien Borderie), l'autre sur la corrosion des armatures dans le béton (UPE-IFSTTAR), et deux autres seront soutenues par des bourses CIFRE, la première sur le développement de nouvelles approches de nettoyage par laser (UPMC) et la seconde sur l'étude des mécanismes de transfert des composés ferro-manganésifères dans la formation des patines superficielles des grès (UPE). Deux de ces thèses s'appuient sur le nouveau partenariat avec UPE, qui gèrera les salaires des doctorants pour le compte du LRMH.

Par ailleurs, si nous sommes en attente du possible financement du projet IPERION-CH, nous avons déjà passé plusieurs mois à préparer l'inscription de la future infrastructure européenne sur les matériaux du patrimoine, à la fois dans la feuille de route des infrastructures nationales, procédure gérée par le MENESR, et dans la feuille de route ESFRI au niveau européen. Ce projet a été présenté le 27 novembre dernier par Loïc Bertrand, directeur d'IPANEMA et moi-même, au Haut conseil des très grandes infrastructures au MENESR. Si ce projet est accepté, c'est une formidable opportunité qui s'offre aux institutions françaises impliquées dans la recherche sur la connaissance et la conservation du patrimoine culturel, non seulement de pérenniser le réseau national et européen qu'elles ont établi depuis plusieurs années, mais aussi d'ouvrir leurs outils et leurs compétences à des partenariats de recherche renouvelés. Elle implique à ce jour le C2RMF, le LRMH, IPANEMA, l'INRIA, le MNHN et la Fondation des sciences du patrimoine.

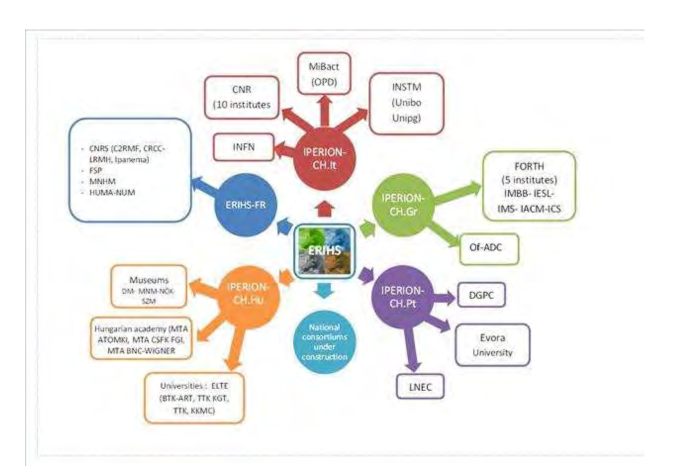


Figure 2 : schéma du réseau de la plate-forme européenne ERIHS.

Dans le domaine de nos projets d'aménagement, l'année 2015 devra voir se mettre en route et aboutir le projet de laboratoire d'optique. Parallèlement sera menée l'étude de programmation qui doit nous permettre une rationalisation de l'utilisation de nos espaces.

Enfin il faut signaler le lancement de la restauration des vitraux du XIIe siècle de la cathédrale de Saint-Denis, sous maîtrise d'ouvrage de la DRAC d'Île-de-France, et qui se fera, sur notre proposition, dans nos locaux, les espaces de l'ancien STAP réaménagés à cet effet. Les restauratrices, Isabelle Baudoin et Bénédicte Lacheré, pourront ainsi bénéficier d'un encadrement scientifique de proximité et d'outils d'observation de qualité, pour le traitement d'œuvres fragiles, très difficiles à déplacer.

Isabelle PALLOT-FROSSARD

1.2 Liste des membres du conseil scientifique

1.2.1 Membres de droit

Vincent BERJOT
Directeur général des patrimoines
Ministère de la Culture et de la Communication - 182 rue Saint-Honoré - 75033 Paris cedex 01
Tél : 01 40 15 81 99
vincent.berjot@culture.gouv.fr

Jean-Marc BLANCHECOTTE
Architecte des bâtiments de France, chef du service territorial de l'architecture et du patrimoine de Paris
Direction régionale des affaires culturelles d'Ile-de-France - 47 rue Le Peletier - 75009 Paris
Tél. : 01 56 06 51 20 – Fax : 01 56 06 51 05
jean-marc.blanchecotte@culture.gouv.fr

Astrid BRANDT-GRAU
Chef du département de l'enseignement supérieur, de la recherche et de la technologie
Secrétariat général - Service de la coordination des politiques culturelles et de l'innovation
Ministère de la Culture et de la Communication - 182 rue Saint-Honoré - 75033 Paris cedex 01
Tél. : 01 40 15 81 37
astrid.brandt-grau@culture.gouv.fr

Marie-Suzanne de PONTHAUD
Inspecteur général des monuments historiques
59-61 rue de l'Ancienne Mairie - 92100 Boulogne-Billancourt
Tél. : 01 48 25 60 71 – Fax : 01 41 31 05 00
ponthaud@club-internet.fr

Lorraine MAILHO
Directeur du centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) par intérim
Palais du Louvre - Porte des Lions - 75001 Paris
Tél. : 01 40 20 84 09 – Fax : 01 40 2 68 56
marie.lavandier@culture.gouv.fr

Anne Le BOT-HELLY
Conservateur régional de l'archéologie
Direction régionale des affaires culturelles de Rhône-Alpes - 6 quai Saint-Vincent - 69283 Lyon cedex 01
Tél : 04 72 00 44 80 – Fax : 04 72 00 44 57
anne.lebot-helly@culture.gouv.fr

Jean-Michel LOYER-HASCOËT
Sous-directeur des monuments historiques et des espaces protégés
Ministère de la Culture et de la Communication - 182 rue Saint-Honoré - 75033 Paris cedex 01
Tél. : 01 40 15 77 48
jean-michel.loyer-hascoet@culture.gouv.fr

Jacques PHILIPPON
Conservateur régional des monuments historiques
Direction régionale des affaires culturelles du Nord-Pas-de-Calais - Hôtel Scrive – 3 rue du Lombard - 59800 Lille cedex
Tél. : 03.28.36.61.01 – Fax : 03 28 36 62 22
jacques.philippon@culture.gouv.fr

Olivier POISSON
Inspecteur général des monuments historiques
Ministère de la Culture et de la Communication - Direction générale des patrimoines - 6 rue des Pyramides - 75001 Paris
Tél. : 01 40 15 75 83
olivier.poisson@culture.gouv.fr

1.2.2 Personnalités qualifiées

Isabelle BAUDOIN-LOUW
Restauratrice de vitraux
19 avenue Alexandre Dumas - 91550 Paray Vieille Poste
Tél. : 01 69 38 72 48
atelierbaudoin@orange.fr

Christophe BOTTINEAU
Architecte en chef des monuments historiques
68 rue Nollet - 75017 Paris
Tél. : 01 46 22 29 04
bottineau.acmh@wanadoo.fr

Georges CALAS
Professeur
Institut de minéralogie et de physique des milieux condensés - Université Pierre et Marie Curie/Paris VI, UMR CNRS 7590 - Tour 23-24/4e étage - Case Courrier 115 - 4 Place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05
Tél. : 01 44 27 68 72
georges.calas@impmc.jussieu.fr

Marián del EGIDO
Jefa de Área de Investigación y Formación
Instituto del Patrimonio Cultural de España - Ministerio de Cultura - C/ Pintor el Greco 4 (Ciudad Universitaria)
28040 Madrid (Espagne)
Tél. : +34 91 5504538
marian.delgido@mecd.es

Philippe DILLMANN
Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération (LAPA) de l'IRAMIS/SIS2M
Bât 524 - CEA – Saclay - 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : 01 69 08 14 69
philippe.dillmann@cea.fr

Joëlle DUPONT
Professeur
Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) - Département Systématique et Évolution
57 rue Cuvier - 75231 Paris
Tél. : 01 40 79 31 90
jdupont@mnhn.fr

Roland MAY
Directeur
Centre Interdisciplinaire de conservation et restauration du patrimoine (CICRP)
21 rue Guibal - 13003 Marseille
Tél. : 04 91 08 23 39
roland.may@cicrp.fr

Henri VAN DAMME
Directeur scientifique
Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)
14-20 boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2
Tél. : 01 64 15 37 27
henri.van-damme@ifsttar.fr

1.2.3 Représentants du personnel

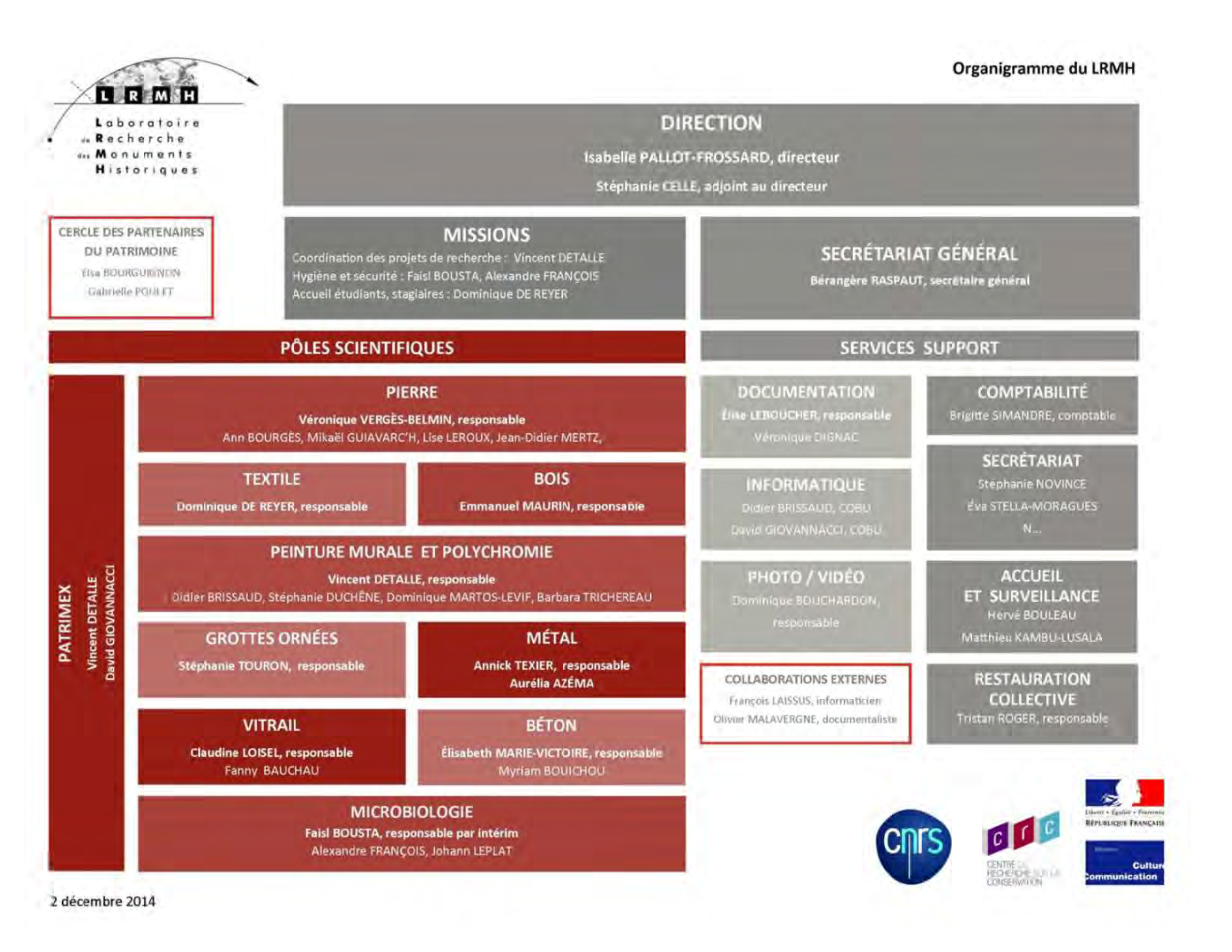
Alexandre FRANÇOIS
Technicien de recherche – Pôle scientifique Microbiologie
Laboratoire de recherche des monuments historiques - 29 rue de Paris – 77420 Champs-sur-Marne
Tél : 01 60 37 77 80
alexandre.francois@culture.gouv.fr

Annick TEXIER
Ingénieur de recherche – Pôle scientifique Métal
Laboratoire de recherche des monuments historiques - 29 rue de Paris – 77420 Champs-sur-Marne
Tél : 01 60 37 77 96
annick.texier@culture.gouv.fr

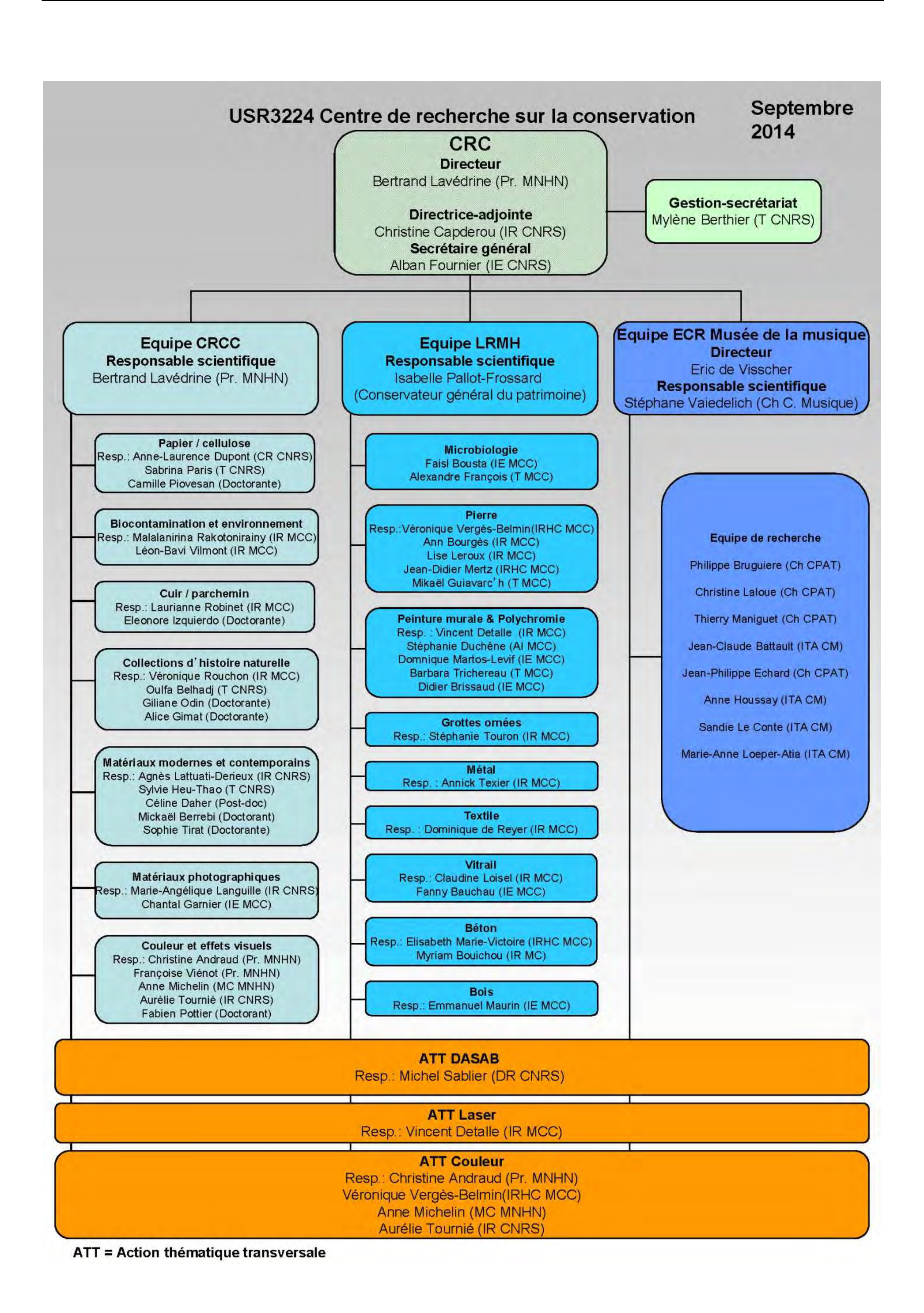
2 PARTIE I – BILAN ADMINISTRATIF ET FINANCIER

2.1 Organigrammes

2.1.1 Organigramme du LRMH



2.1.2 Organigramme du CRC (Centre de recherche sur la conservation) –USR 3224



L'administration de l'établissement repose sur les services support (documentation, informatique et photo/vidéo) et les services administratifs (comptabilité, secrétariat, accueil et surveillance) en lien direct avec le secrétaire général. En 2013 et 2014 ces services ont mis l'accent sur la rationalisation des procédures pour alléger la charge de travail dans un univers contraint en termes budgétaires et de ressources humaines.

2.1 Les ressources humaines

35 personnes sont actuellement en poste au LRMH. Les effectifs sont constitués de 30 agents titulaires (1 conservateur général du patrimoine, 1 architecte urbaniste de l'État, 11 ingénieurs de recherche, 6 ingénieurs d'étude, 1 assistant d'ingénieur, 4 techniciens de recherche, 1 secrétaire de documentation, 1 secrétaire administrative, 2 adjoints administratifs, 2 adjoints techniques d'accueil, de surveillance et de magasinage) et de 5 agents contractuels (1 CDI, 2 CDD de trois ans et 2 CDD d'une année).

Durant l'année 2013, 3 agents sont partis en retraite dont 1 a été remplacé (le secrétaire général). 1 ingénieur de recherche pôle analytique est parti en mutation, 2 ingénieurs (pôle métal et instrumentation scientifique - projet Patrimex) ont été recrutés en contrat à durée déterminée d'une année. En 2014, 1 adjoint administratif a intégré le secrétariat de direction, 1 départ en retraite a été aussitôt remplacé (l'agent chargé de la restauration collective) et 1 départ par mutation d'un adjoint administratif est en cours de remplacement. 1 ingénieur de recherche a été recruté pour renforcer le pôle de microbiologie.

Le recrutement d'ingénieur de recherche ou ingénieur d'étude par contrat à durée déterminée pose le problème de la pérennité des acquis des projets de recherche menés par le LRMH.

2.1.1 Évolution des effectifs du 31/12/2008 au 31/12/2014

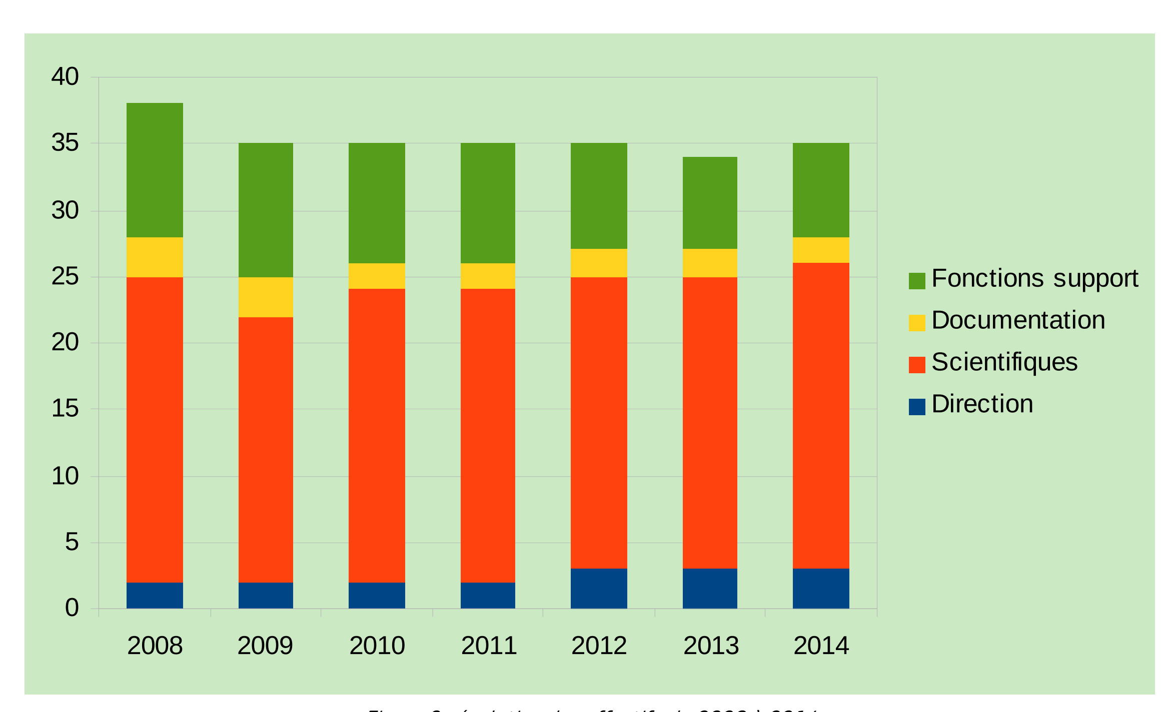


Figure 3 : évolution des effectifs de 2008 à 2014.

		2012	2013			2014			
			Effectifs au 1er janvier	Mouvements	Observations	Effectifs au 1er janvier	Mouvements	Observations	Effectifs au 31 décembre
DIRECTION		**3**	**3**			**3**			**3**
Conservateur général du patrimoine	Directeur	1	1			1			1
Architecte urbaniste de l'État	Adjoint au directeur	1	1			1			1
Ingénieur des services culturels et du patrimoine	Secrétaire général	1	1	- 1	Départ en retraite				
Contractuel administration				+ 1	Recrutement en remplacement	1			1
POLES SCIENTIFIQUES		**22**	**22**			**22**			**23**
Ingénieurs de recherche		13	13	- 1	Départ en mutation ingénieur de recherche pôle analytique	11	+ 1	Recrutement contrat 3 ans ingénieur de recherche pôle microbiologie	12
				- 1	Départ chef du pôle microbiologie en retraite				
Ingénieur de recherche contractuel				+ 1	Recrutement ingénieur de recherche instrumentation Patrimex	1		Renouvellement contrat 1 an ingénieur de recherche instrumentation Patrimex	1
Ingénieurs d'étude		4	4			4	+ 1	Promotion d'un assistant-ingénieur dans le corps des ingénieurs d'étude	5
Ingénieur d'étude contractuel				+ 1	Recrutement chargée de recherche pôle métal	1		Renouvellement contrat 1 an chargée de recherche pôle métal	1
Assistant d'ingénieur		1	1	+ 1	Détachement d'un technicien de recherche dans le corps des assistants-ingénieurs	2	- 1	Cf. supra	1
Techniciens de recherche		4	4	-1	Cf. supra	3			3
SUPPORTS et ADMINISTRATION		**10**	**10**			**9**			**9**
Ingénieur d'études	Documentation	1	1			1			1
Secrétaire de documentation	Documentation	1	1			1			1
Technicien de recherche	Photographie / vidéo	1	1			1			1
Adjoint administratif	Secrétariat de direction	3	3	- 1	Départ en retraite	2	- 1	Mutation	2
	Secrétariat de direction						+ 1	Recrutement en remplacement	
Secrétaire administratif	Comptabilité	1	1			1			1
Contractuels administration	Chargé de la restauration collective	1	1			1	- 1	Départ en retraite	1
	Chargé de la restauration						+ 1	Recrutement en remplacement	
Adjoints techniques d'accueil, de surveillance et de magasinage		2	2			2			2
TOTAL DES EFFECTIFS		**35**	**35**			**34**			**35**

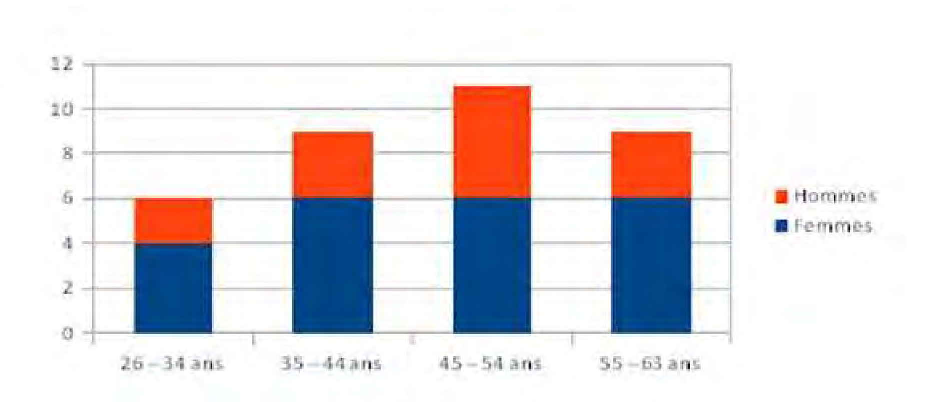


Figure 4 : répartition par tranche d'âge et par sexe du personnel.

La moyenne d'âge du personnel de l'établissement est de 46 ans.

2.1.2 Vacations

L'établissement a disposé de 12 mois de vacations de recherche en 2013 et 16 mois en 2014 pour soutenir le travail des équipes permanentes, en particulier la documentation (8 mois) et le pôle pierre (12 mois).

Il a également bénéficié de 23 jours en 2013 et de 15 jours en 2014 de vacations d'accueil et de surveillance pour suppléer durant leurs périodes de congés aux 2 adjoints techniques d'accueil, de surveillance et de magasinage en poste. Le solde des jours nécessaires pour combler ces absences a dû être externalisé.

2.1.3 Stagiaires

Dans le cadre de sa mission de formation et de diffusion des savoirs, le LRMH accueille des étudiants sous convention pour remplir des missions spécifiques, et la plupart du temps en appui des équipes dans un domaine sur lequel ils sont particulièrement compétents. Ces étudiants sont venus d'horizons très variés : master de conservation-restauration des biens culturels, master de recherche en microbiologie, master matériaux du patrimoine culturel et archéométrie, master matériaux du patrimoine dans l'environnement, École nationale supérieure d'ingénieurs de Caen, Institut d'optique Graduate School, 1er cycle de l'école du Louvre, diplôme de spécialisation et d'approfondissement à l'École de Chaillot, licence sciences et technologie « biologie-santé-environnement », licence au département de géosciences de l'École normale supérieure. Ils ont été reçus dans les pôles Grottes ornées, Peintures murales et polychromie, Pierre et Microbiologie. Le LRMH aura ainsi accueilli 5 stagiaires conventionnés en 2013 et 4 en 2014.

L'établissement s'attache également à accueillir chaque année des collégiens dans le cadre de la séquence d'observation obligatoire d'une semaine en classe de 3e.

2.1.4 Hygiène et sécurité

Le personnel de l'établissement est suivi par la médecine de prévention externalisée à un prestataire privé, la société SIMT. L'attention de la médecine de prévention est particulièrement portée sur les 23 personnels des pôles scientifiques compte tenu du risque particulier auquel ils sont exposés lors de la manipulation des instruments scientifiques (rayons ionisants).

L'utilisation d'instruments à rayons ionisants astreint l'établissement à l'habilitation d'un de ses agents en tant que personne compétente en radio-protection (PCR), habilitation pour laquelle il reçoit une formation spécifique. Son rôle est, entre autres, d'assurer la formation à la protection des rayons ionisants et le suivi de leur exposition de ses collègues en liaison avec l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et la médecine de prévention. Cette mission est remplie par le responsable du pôle Peintures murales et polychromie.

2 agents de prévention complètent le dispositif de veille au respect des règles d'hygiène et de sécurité du travailleur au sein du laboratoire.

2.2 Budget

Le financement des activités du LRMH se décompose en crédits alloués par le programme Recherche (186) pour l'ensemble des activités scientifiques représentant environ 85 % de son budget total et en crédits alloués par le programme Patrimoine (175) pour l'entretien et l'aménagement des bâtiments. La définition claire des actions financées par chacun des deux programmes a été finalisée sur les deux derniers exercices.

ENSEMBLE DES PROGRAMMES	**2012**		**2013**		**2014**	
Crédits notifiés	**AE**	**CP**	**AE**	**CP**	**AE**	**CP**
Fonctionnement	749 905	751 809	747 133	757 133	699 391	699 391
Investissement	118 991	118 991	117 245	117 245	194 397	314 397
TOTAL	868 896	870 800	864 378	874 378	893 788	1 013 788
Répartition réalisée	**AE**	**CP**	**AE**	**CP**	**AE**	**CP**
Fonctionnement	749 905	751 809	791 034	801 151	744 225	759 548
Investissement	118 991	118 991	246 827	126 827	117 527	222 204
TOTAL	868 896	870 800	1 037 861	927 978	861 752	981 752

AE = autorisations d'engagement - CP = crédits de paiement

L'année 2013 a été marquée par un abondement exceptionnel de 173 K€ du programme 186 en fin d'exercice qui a permis l'acquisition de plusieurs équipements scientifiques.

En revanche, en 2014, les crédits notifiés sur le programme 186 sont en baisse de 6 % par rapport aux années précédentes. Cette baisse affecte principalement les crédits de fonctionnement.

PROGRAMME 186	2012		2013		2014	
Crédits notifiés	AE	CP	AE	CP	AE	CP
Fonctionnement	649 905	651 809	604 743	604 743	577 591	577 591
Investissement	118 991	118 991	117 245	117 245	144 397	264 397
TOTAL	768 896	770 800	721 988	721 988	721 988	841 988
Répartition réalisée	AE	CP	AE	CP	AE	CP
Fonctionnement	649 905	651 809	648 644	648 761	604 461	619 784
Investissement	118 991	118 991	246 827	126 827	117 527	222 204
TOTAL	768 896	770 800	895 471	775 588	721 988	841 988

L'acquisition des équipements scientifiques en fonctionnement (moins de 10 K€) et en investissement représentent chaque année environ 40 % du programme 186. L'équipement du LRMH a pu être ainsi complété, en particulier, en 2013 et 2014 par l'acquisition d'une rodeuse automatique, d'un appareil de mesure de la résistance au percement des matériaux, d'un véhicule de service, d'un microscope 3D et d'un analyseur gravimétrique à adsorption de vapeur d'eau, d'une table optique et d'onduleurs. Enfin deux tranches fonctionnelles (64 K€) ont été créées pour anticiper l'acquisition en 2015 d'un cytomètre en flux et d'un appareil de mesure de surface.

15 % du programme 186 sont dédiés au financement des différentes études, pour 2013 et 2014.

Liste des études scientifiques financées ou co-financées sur le programme 186

Identification par voie moléculaire d'une centaine de souches de champignons isolés sur les matériaux du patrimoine (Museum national histoire naturelle)
Fabrication de dalles de béton armé (Centre scientifique et technique du bâtiment)
Origine des dépôts minéraux dans les cavités ornées : isotopes stables et chromatographie des eaux (Université de Saint-Étienne)
Lutte contre la mite des vêtements (Université François Ier de Tours)
Étude métallographique de plombs et fer (Anne Zymla) ;
Mise au point du système SUSI pour béton-ELAB
Développement des techniques d'identification de micro-organismes par LIBS (EZUS Lyon)
Mise au point d'un logiciel pour le LIBS – EZUS Lyon
Étude de la consolidation des soies par la fibroïne solubilisée - Université Paris 6 - Pierre et Marie Curie.
Thèse LIBS-LIF-RAMAN (Université de Cergy-Pontoise)
Thèse : Caractérisation de l'adhérence de renforcements locaux sur des structures bois anciennes (3/3) ;
Thèse : Application de la thermographie infra-rouge au diagnostic d'œuvres patrimoniales –Université de Reims Champagne Ardennes –URCA
Thèse : Étude des produits de corrosion à l'interface acier-béton –Université Paris-Est
1re thèse : Effet du rayonnement UV-C sur les micro-organismes (algues et champignons) contaminant les milieux obscurs (CNRS – Université de Franche-Comté)
2e thèse : Impact du rayonnement UVC sur les algues et les champignons –– Université de Franche-Comté

10 % du budget total (programmes 186 et 175) sont alloués pour gérer les questions informatiques tant bureautiques que documentaires et scientifiques. Un audit réalisé en 2014 a permis de mettre en lumière les obsolescences et les dysfonctionnements actuels du système d'information du LRMH. Une première tranche de travaux est réalisée dès 2014 en coordination avec la sous-direction des systèmes informatiques du ministère pour permettre à l'ensemble du système de répondre aux besoins d'acquisition et de circulation des données informatiques, générés par les derniers équipements scientifiques acquis et les programmes de recherche

telle la mise en place du laboratoire mobile dans le cadre de l'EquipEx Patrimex. Il s'agit d'un véritable enjeu stratégique pour le laboratoire.

La maintenance des équipements du bâtiment (installations électriques, climatisation, système de sûreté et sécurité) représente environ 10 % de l'enveloppe du programme 175. Des interventions ponctuelles importantes ont par ailleurs été menées comme la mise en place d'un nouvel organigramme des clés avec un passe général (15 K€), la reprise d'un certain nombre de menuiseries extérieures et leur remise en peinture (20 K€), la réfection des sols amiantés et murs de la salle de conférence (18 K€), la mise aux normes partielle des installations électriques (y compris blocs de secours : 30 K€), la création d'un atelier du vitrail avec le déménagement des vitraux de Saint-Denis (35 K€), la reprise des deux verrières sérieusement endommagées suite à un orage de grêle (20 K€), la remise en état d'un logement de fonction.

En investissement, sur le programme 175, le projet de la création d'un laboratoire d'optique lié au programme de recherche de l'EquipEx Patrimex, sous maîtrise d'ouvrage du Centre des monuments nationaux (CMN) a été poursuivi. Ce projet d'aménagement a été retardé en raison de la découverte de problèmes de sol. À l'appui de meilleurs résultats de nouveaux sondages, les études de projet vont reprendre pour un chantier prévu en 2015.

Une étude de programmation dont l'objectif est d'organiser le redéploiement des activités du LRMH sur son site considérant de nouveaux espaces mis à disposition par le CMN à la fin de l'année 2015, soit potentiellement 220 m² était programmée en 2014 Cette étude de programmation doit permettre d'optimiser l'utilisation des bâtiments en redistribuant au mieux et après diagnostic, les espaces de laboratoire, les espaces tertiaires, les espaces de réserves et de stockage ainsi que ceux dédiés au personnel. Cette étude permettra d'aboutir à un schéma directeur d'aménagement pour le site du LRMH, qui sera accompagné d'une programmation de travaux d'investissement annuels dans un souci de maîtrise de l'économie globale du projet de redéploiement. Cependant cette démarche prospective a été ralentie par le retard et les questions structurelles posées par le projet de la création du laboratoire d'optique. Cette enveloppe n'a donc pas été consommée en 2014.

PROGRAMME 175	**2012**		**2013**		**2014**	
Crédits notifiés	**AE**	**CP**	**AE**	**CP**	**AE**	**CP**
Fonctionnement	100 000	100 000	142 390	152 390	121 800	121 800
Investissement	0	0	0	0	50 000	50 000
TOTAL	100 000	100 000	142 390	152 390	171 800	171 800
Répartition réalisée	**AE**	**CP**	**AE**	**CP**	**AE**	**CP**
Fonctionnement	100 000	100 000	142 390	152 390	139 764	139 764
Investissement	0	0	0	0	0	0
TOTAL	100 000	100 000	142 390	152 390	139 764	139 764

2.3 Informatique

Le système d'information du LRMH se scinde en deux réseaux distincts :

- le réseau documentaire, géré par un prestataire (Cabinet François Laissus) ;
- le réseau dit « culture », comprenant la bureautique et les instruments scientifiques, géré en interne par deux correspondants « bureautique » (COBU), Didier Brissaud et David Giovannacci au niveau technique, puis en externe par une société d'infogérance.

Le parc informatique du réseau « culture » est constitué d'une centaine de postes (fixes, portables et postes scientifiques), pour la très grande majorité sous Windows XP. Les serveurs sont au nombre de huit, sous FreeBSD.

L'ancienneté des éléments constituant le réseau « culture » (fin des années 90), l'augmentation des besoins en informatique et le départ de l'informaticien chargé du réseau « culture » ont pour conséquence que le temps imparti aux tâches informatiques prend une part de plus en plus importante du temps de travail des acteurs internes (~30 %) au détriment de leurs missions scientifiques.

Un audit du système d'information du laboratoire a été commandé et réalisé par la junior entreprise Dièse pour avoir un diagnostic clair de la situation et faire évoluer notre infrastructure informatique. Leurs recommandations ont permis d'avancer dans notre réflexion sur la restructuration des réseaux du LRMH aussi bien pour le matériel que pour les logiciels. Cette restructuration nécessite un investissement lourd et ne peut se faire que sur plusieurs années. En outre, elle doit prendre en compte les besoins d'ouverture du LRMH aux nouvelles technologies de l'information (mobilité, interactivité) ainsi qu'une volumétrie de stockage des données de plus en plus importante.

Le prestataire infogérance ne nous ayant pas satisfait, une consultation a été lancée pour trouver un nouveau prestataire : la société Netquarks a été choisie. Après six mois de travail, le résultat est satisfaisant aussi bien au niveau technique qu'au niveau des relations humaines.

Après étude et discussion, la société Netquarks propose de nouvelles configurations matérielles et logicielles du réseau « culture » :

- diminution du nombre de serveurs avec une virtualisation de ces derniers ;
- changement du système d'exploitation (Windows server) pour une meilleure appréhension par les correspondants bureautiques et une uniformisation avec les outils de la sous-direction des systèmes informatiques du ministère de la Culture et de la Communication (SDSI).

Aux niveaux bureautique et scientifique, le système d'exploitation de la très grande majorité des postes est Windows XP, dont la mise à jour est arrêtée depuis avril 2014. La politique de sécurité de la SDSI implique un passage progressif et obligatoire de toutes les unités vers Windows 7. Pour les postes bureautiques, la SDSI fournira au LRMH une vingtaine de postes récents sous Windows 7. Les postes restants devront migrer sous Windows 7 ou être déconnectés du réseau. Cela implique la création d'un réseau scientifique parallèle, complètement déconnecté du réseau « .gouv ».

La migration des postes de Windows XP à Windows 7 est lourde : deux jours en moyenne par poste sont nécessaires pour la migration, la réinstallation des logiciels idoines (parfois incompatibles avec Windows 7) puis le transfert des données des agents.

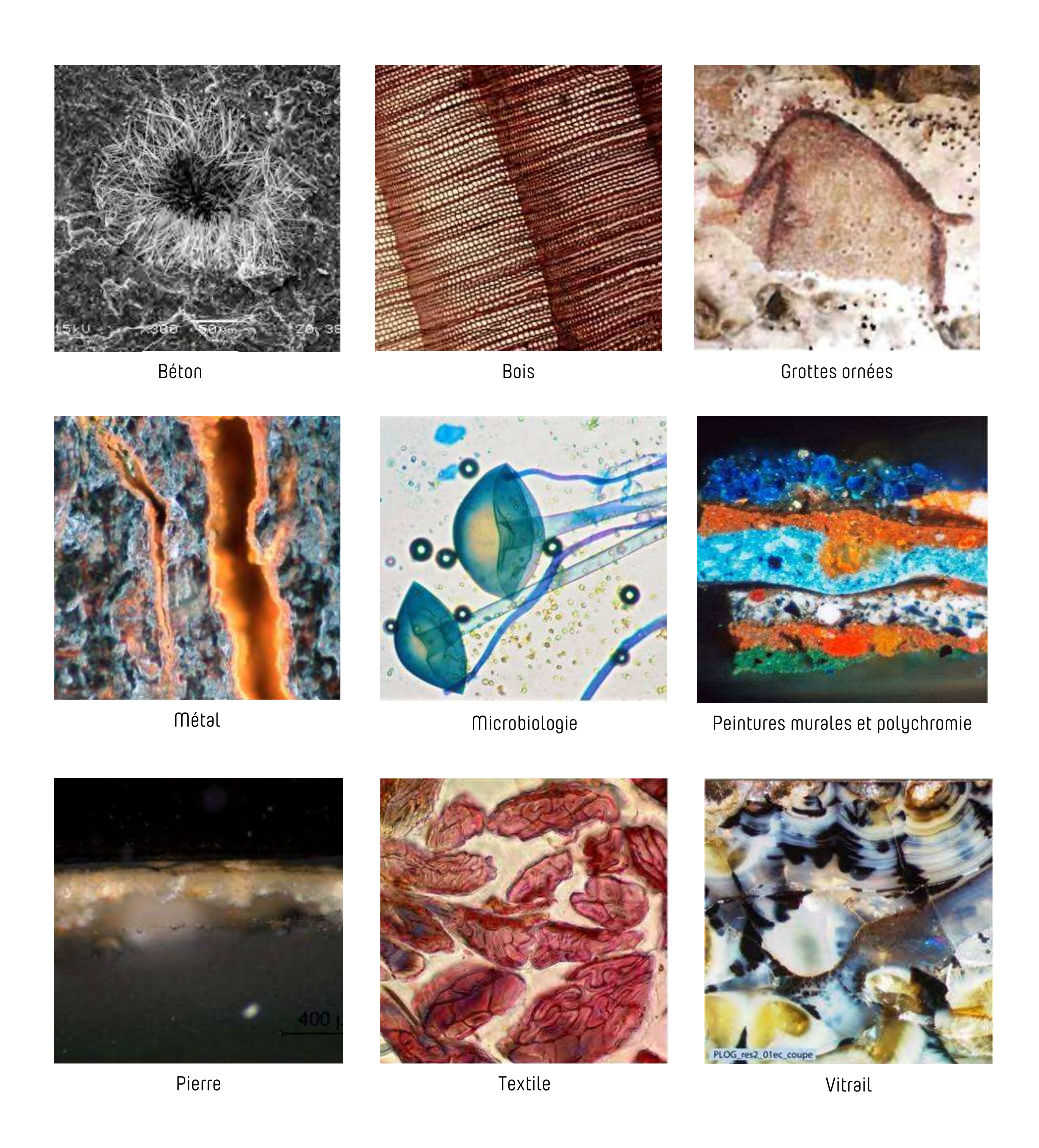
Une nouvelle politique de sauvegarde des données des agents a été mise en place par les correspondants « bureautique » afin de pérenniser celle-ci, en délocalisant un système Network Attached Storage (NAS) dans un autre bâtiment. En outre, suite à la panne définitive de deux des serveurs (carte mère et disque dur) une réorganisation des sauvegardes a également été effectuée. Une surveillance régulière non seulement des sauvegardes, mais aussi de la volumétrie est nécessaire. Ainsi, hebdomadairement une analyse des divers répertoires des serveurs s'avère obligatoire afin d'en préserver le bon fonctionnement.

En 2015, le LRMH sera connecté au réseau interministériel de l'État (RIE). Cette connexion (par fibre optique) impliquera une mise en conformité avec la politique de sécurité intergouvernementale, et donc un changement des pratiques quotidiennes des usagers.

Didier Brissaud, ingénieur d'étude
David Giovannacci, ingénieur de recherche

3 PARTIE 2 – BILAN SCIENTIFIQUE

3.1 Activités des pôles scientifiques



Béton

Bois

Grottes ornées

Métal

Microbiologie

Peintures murales et polychromie

Pierre

Textile

Vitrail

PÔLE SCIENTIFIQUE Béton

Introduction

Le béton est aujourd'hui le principal matériau de construction dans le monde. Si l'histoire des bétons et mortiers a débuté dès l'Antiquité, c'est à partir du XVIII[e] siècle que le béton tel qu'on le connaît aujourd'hui a été développé. Renforcé par des armatures, ce nouveau matériau moulable et particulièrement performant en termes de propriétés mécaniques a alors généré un courant d'innovation dans l'architecture. Aujourd'hui, de plus en plus de « témoins » de cette épopée du béton sont protégés au titre des monuments historiques. Ainsi la France compte actuellement plus de 800 édifices en béton ou contenant du béton, inscrits ou classés monuments historiques. Or si certains de ces monuments sont particulièrement bien conservés, d'autres présentent des états de dégradation très avancés, nécessitant des traitements de restauration spécifiques.

Fort de ce constat, le ministère de la Culture et de la Communication a ouvert une porte à ce matériau dans le milieu de la conservation, tout d'abord au travers de programmes de recherches financés par le biais de mécénat industriel (dont font partie les grands cimentiers français), dans le cadre du Cercle des partenaires du patrimoine (CPP). Puis en 1997, le pôle Métal a étendu son activité au béton et, en 2003, le pôle Béton a été créé. Enfin, en 2011 un second ingénieur de recherche a rejoint le pôle, tout en continuant ses activités de recherche au CPP.

Les activités du pôle Béton s'articulent autour de 5 missions : le service ; la recherche ; la participation à des groupes de travail et comités scientifiques de congrès ; l'encadrement et l'enseignement ; et enfin la valorisation.

➢ La mission de **service et expertise** occupe une place prépondérante au sein du pôle. Elle se traduit par la réalisation d'études menées dans le cadre de demandes émanant des services des monuments historiques, mais comporte également un volet d'assistance à maîtrise d'œuvre ou d'ouvrage dans le cadre de chantiers de restauration. Le pôle reçoit en moyenne une vingtaine de nouvelles demandes par an. Si certaines de ces demandes font l'objet de réponses rapides par courriel, la plupart nécessitent un déplacement sur site, qui s'accompagne souvent de prélèvements nécessitant des analyses, puis un suivi de chantier, ce qui représente une charge de travail pouvant s'étaler sur plusieurs mois.



Figure 5 : façade nord, église Saint-Louis de Vincennes (1914-1924), structure en béton armé recouverte de pierre de meulière, verrière composée de 20 panneaux en mortier armé et pièces de verre, posés sur une ossature en béton armé monobloc (Bétons Armés Hennebique).

Le traitement de la corrosion des armatures, le nettoyage de salissures noires ou de recouvrements biologiques, et l'identification et la caractérisation des mortiers et bétons sont les problématiques les plus fréquemment soulevées. Le patrimoine concerné s'étend de bâtiments publics (Hôtel de Ville à Boulogne, collège Jean Lurçat à Villejuif, piscine des Amiraux à Paris), à des édifices religieux (églises Notre-Dame de Bethléem à Clamecy, Saint-Louis à Vincennes (Fig.4), Saint-Pierre à Lamotte-Warfusée), en passant par des monuments commémoratifs (mémorial des Martyrs de la Déportation à Paris). Les pathologies affectent des éléments de structure, des façades, mais aussi des sculptures et verrières associant verre et béton.

Le béton étant un nouveau matériau du patrimoine, les demandeurs sont souvent démunis, d'autant plus que l'état d'altération des monuments dont ils ont la charge est parfois très avancé. Si les études et recherches menées depuis maintenant plus de 20 ans au LRMH et dans le cadre du CPP ont permis d'améliorer la compréhension des mécanismes d'altération de ces bétons anciens, mais aussi d'étendre le panel de solutions de conservation/restauration, de nombreuses thématiques de recherche restent à explorer.

➢ La **recherche** représente donc une part importante de l'activité du pôle. Trois principaux axes sont développés : l'identification des ciments anciens, le diagnostic *in situ* de la corrosion des armatures dans les bétons, et les traitements de conservation adaptés aux bétons anciens.

Le premier pan de notre mission de recherche consiste à rédiger des projets destinés à des appels à projets nationaux (Agence nationale de la recherche (ANR), Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en

génie civil (IREX),…) et européens (JPI, H2020), mais aussi à rechercher et/ou fidéliser des partenaires du CPP, ou encore à monter des thèses. Ainsi, en 2013 le projet européen ***Redmonest*** a été lauréat de l'initiative de programmation conjointe sur le patrimoine culturel (JPI-CH) et un budget du **DIM-Oxymore** a permis l'acquisition d'une série de capteurs destinés à un projet de suivi de la corrosion d'armatures dans les bétons carbonatés. En 2014, le projet ***Perfdub*** a été retenu par l'**IREX** et une thèse a démarré en co-financement avec l'**Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux - Paris (IFSTTAR)-**. Enfin, en 2013, le projet du **CPP** dédié au ***patrimoine en ciment naturel de la région de Marseille*** avec pour partenaire industriel la société **VICAT**, s'est achevé.

En 2013 et 2014, le pôle Béton du LRMH a été sollicité par le **Getty Institute of Conservation** (Los Angeles, État-Unis) pour participer à un congrès et à plusieurs *expert meetings* dans le cadre d'une initiative dédiée à la conservation de l'architecture moderne (Conserving modern architecture initiative).

Par ailleurs, plusieurs projets de recherche sont menés sur fonds propres. Ainsi, depuis 2012, une collaboration est engagée avec la société ELAB (*start-up* du CNR italien) dans le but de développer un outil de mesure non destructif adapté à la mesure de la teneur en eau et en sels dans les bétons (**SUSI**). Le pôle Béton contribue aussi à l'opération de recherche stratégique et incitative (ORSI), dénommée **APOS** (Auscultation pour des ouvrages sûrs), dédiée au suivi de la corrosion induite par les ions chlorure, menée par l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) et le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA). Dans le même esprit, en partenariat avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) (Paris), l'IFSTTAR (Paris), le Centre scientifique et technique de la construction (CSTC) (Limelette – Belgique) et la société Bouygues, un programme dédié au suivi de la corrosion d'armatures noyées dans du béton armé va démarrer en 2015 (Cf. DIM-Oxymore). Depuis plusieurs années le pôle Béton s'intéresse également à l'identification et à la conservation du **patrimoine en ciment naturel du XIXe siècle**, ce qui a permis un pont entre les activités de service et de recherche, plusieurs projets ayant été financés sur cette thématique dans le cadre du CPP, mais aussi des études approfondies ayant été menées notamment sur les restaurations en ciment naturel, des portails des cathédrales de Troyes et Angers. L'ensemble de ces projets et études a permis la mise au point d'une technique fiable d'identification des ciments naturels datant du XIXe siècle.

Enfin, des problématiques récurrentes de restauration issues de demandes de service ont été à l'origine de plusieurs thématiques transversales de recherche au sein du LRMH, notamment sur la conservation des vitraux associant verre et mortiers de ciment (projets de recherche communs pôles Béton et Vitrail). Plus récemment 3 pôles du LRMH (Béton, Métal et Peintures murales et polychromie), le C2RMF et le CICRP se sont rassemblés au sein d'un groupe de travail dédié à la conservation des peintures industrielles des XIXe et XXe siècles.

➢ Le nombre d'agents du pôle Béton étant limité, il s'est avéré absolument nécessaire de s'insérer dans le tissu associatif industriel et universitaire, afin de développer des partenariats, mais aussi de rechercher des contacts experts dans différents domaines (corrosion, ciments…). Aussi le pôle Béton est depuis de nombreuses années partenaire du **CEFRACOR** (Commission Construction-bâtiment), mais aussi de **BETOCIB** ou **CIMBETON**.

Par ailleurs, les agents du pôle Béton sont membres permanents ou occasionnels de plusieurs **comités scientifiques** de conférences internationales (cf. p. 150), mais aussi du comité de pilotage de l'axe 3 « Interfaces, transport et réactivité » du **LabEx Matisse**.

➢ La quatrième mission du pôle Béton consiste à diffuser le savoir acquis au fur et à mesure des années sur les bétons anciens, par le biais **d'enseignements** dans différentes structures (cf. p. 164), mais aussi dans le cadre de formations spécialisées dispensées pour le compte du ministère de la Culture et de la Communication. Chaque année, nous accueillons également des stagiaires, doctorants ou post-doctorants. Par ailleurs, depuis la création du CPP, les agents du pôle Béton ont encadré 5 ingénieurs de recherche et 2 ingénieurs d'étude, sur douze programmes de recherche portant essentiellement sur les bétons anciens et 2 ingénieurs de recherche et 2 ingénieurs d'étude dans le cadre de 5 projets européens.

➢ Notre dernière mission consiste à **valoriser** le travail scientifique du pôle, notamment par le biais de la participation à des congrès en tant qu'orateur et/ou président de séance (6 articles ou publications en 2013-2014), mais aussi par la rédaction d'articles dans des revues spécialisées (1 article accepté en 2014). Enfin, nous avons une activité régulière de ***reviewing***, notamment pour la revue *Construction & Building Materials* (cf. p. 153).

Dans ce bilan scientifique, 2 cas d'expertise seront développés autour de 2 thématiques : l'identification de ciments anciens et le nettoyage.

Maisons La Roche-Jeanneret, Paris 16e (75). Identification des mortiers et bétons des façades extérieures.

Dans le cadre de la restauration des façades des maisons La Roche-Jeanneret, conçues par Le Corbusier et Pierre Jeanneret, et construites entre 1923 et 1925, square du Docteur Blanche dans le 16e arrondissement de Paris, l'intervention du pôle Béton a été sollicitée, notamment dans le but d'identifier les matériaux de construction. Dans cet objectif, 9 prélèvements par carottage et grattage ont été réalisés. Suivant les orientations et élévations des deux maisons, 3 types de substrat ont été distingués : un béton gris pour les éléments de structure (Fig. 6), et pour le remplissage, des briques de mâchefer (Fig. 6) de deux types (claires ou foncées).

Les finitions étaient aussi très différentes d'une maison à l'autre, et d'une zone à l'autre, avec des enduits gris ou ocres, de compacité et de composition variables, tous recouverts d'épaisses couches de peinture (Fig. 7).

Une série d'analyses et d'observations à différentes échelles (œil nu, loupe binoculaire, microscope optique et microscope électronique à balayage couplé à une sonde EDS), associée à une recherche documentaire et à la lecture de l'étude préliminaire de 1996 de l'architecte en chef des monuments historiques, Pierre-Antoine Gatier, ont permis d'identifier la composition des mortiers et bétons en présence et d'en caractériser les pathologies.

Ainsi, l'ensemble des bétons et mortiers gris sont à base de ciment de laitier (Fig. 9). Les enduits ocres pour les plus les plus compacts sont hydrauliques, alors que l'enduit ocre le plus friable est composé de sulfate de calcium (Fig. 8) (appellation commerciale de l'époque : *Cimentaline©*).

Les granulats sont généralement constitués d'un mélange silico-calcaire associé à quelques feldspaths potassiques et avec une fraction sableuse essentiellement composée de quartz. Suivant les mortiers et enduits, une présence plus ou moins importante de fragments de mâchefer, sous différentes formes (vitreux, charbonneux, résidus de minerais) a été constatée. Il est à noter que certains fragments de mâchefer sont très riches en inclusions de

Figure 9 : maison La Roche. À gauche, béton de structure recouvert de deux types d'enduits (gris et ocre). À droite, brique de béton de mâchefer foncé, recouvert de deux types d'enduits (gris et ocre). Dans les deux cas, d'épaisses couches de peinture très rigides recouvrent les enduits.

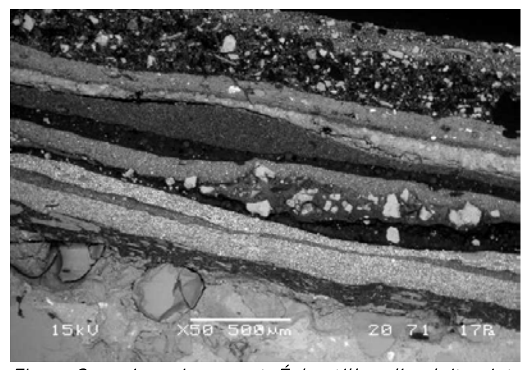


Figure 8 : maison Jeanneret. Échantillon d'enduit peint prélevé en façade sur square. Vue MEB (G=x50) d'une section polie révélant la présence d'une multitude de couches de peinture.

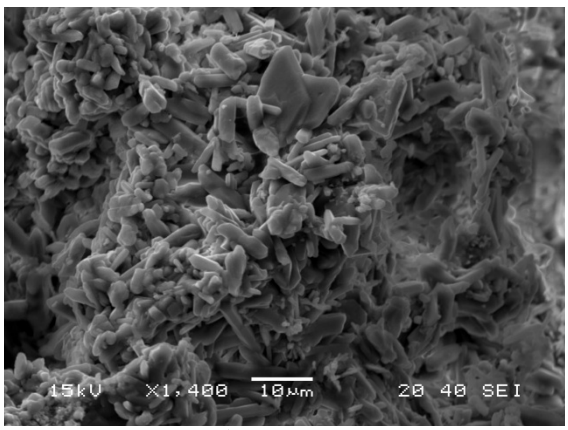


Figure 7 : enduit ocre très friable de de la villa La Roche. Vue MEB (G=x1400) d'une fracture, montrant un tapis de cristaux de sulfate de calcium (enduit de Cimentaline©).

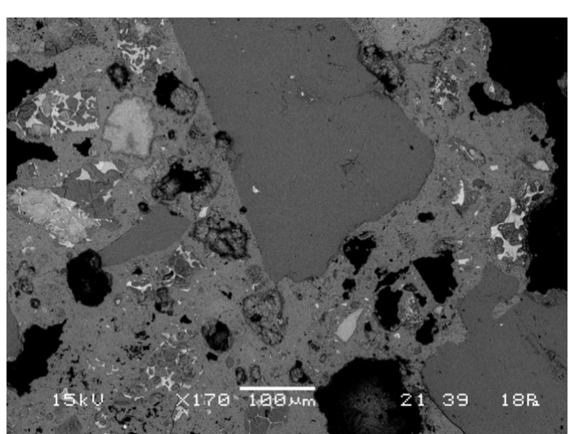


Figure 6 : enduit gris de la villa La Roche. Vue MEB (G=x170) d'une section polie, révélant la présence de nombreuses vacuoles❶, mais aussi de grains de clinker anhydres ❷ et de grains de laitier ❸.

fer, parfois pluri-centimétriques, très sensibles à la corrosion.

L'ensemble de ces mortiers et bétons est de compacité moyenne à médiocre. Ils sont pour la plupart micro et macro-vacuolaires (Fig. 8), avec un mauvais contact granulats-pâte. Néanmoins, ils sont relativement adhérents entre eux, sauf la *Cimentaline©* qui est particulièrement friable.

Une présence généralisée de soufre a été constatée, mais les réactions sulfatiques restent étonnamment limitées (présence localement d'ettringite massive et de thaumasite). Ceci est sans aucun doute lié à l'utilisation de ciments à base de laitier, qui sont moins sensibles aux réactions sulfatiques, notamment du fait de leur faible teneur en portlandite.

Enfin la carbonatation est variable d'une zone à l'autre, mais généralement modérée, vu l'âge des maisons. Cependant, le béton de structure, qui est armé, présente localement une carbonatation excédant les 3 cm, qui atteint sans doute les armatures.

Au-delà de la connaissance des matériaux utilisés par Le Corbusier à cette période de sa production architecturale, cette étude a mis en évidence l'utilisation de liants très atypiques et une pollution généralisée en soufre. Ces dernières informations ont permis d'identifier les principales problématiques de compatibilité et d'élaborer un protocole expérimental de restauration adapté, afin notamment d'éviter une aggravation des réactions sulfatiques au niveau des supports ou d'en générer une dans les enduits de substitution.

Mémorial des martyrs de la Déportation, Paris 4e (75) – Nettoyage des façades extérieures et intérieures

Dans le cadre d'une opération de restauration et de réaménagement général du mémorial des martyrs de la Déportation situé à Paris, une assistance au choix des techniques de nettoyage les plus adaptées aux façades et sols en béton à la fois en intérieur et en extérieur a été demandée au pôle Béton du LRMH. Classé monument historique en novembre 2007, le mémorial a été conçu par Georges-Henri Pingusson et construit en béton armé entre 1960 et 1962 sur la pointe de l'ile de la Cité à Paris.

Une première série d'essais menée en janvier 2013 par une entreprise mandatée par l'architecte en chef Christophe Batard, avait abouti à des résultats mitigés. Aussi, en octobre 2013, une seconde série d'essais de nettoyage a été réalisée en collaboration entre l'architecte en chef, le pôle Béton du LRMH et l'entreprise ECP.

En extérieur, l'objectif était d'éliminer un recouvrement biologique intense, sans doute lié à la fois à l'architecture de l'édifice et à sa localisation en bord de Seine.

En intérieur, probablement en liaison avec le passage des visiteurs, un très léger voile de salissures affectait le béton, avec localement des taches plus importantes au voisinage des bouches d'aération (salissures noires), au sol, en pied de mur (jaunissement dans les zones de remontées capillaires) et enfin sur les angles de murs où les visiteurs ont pu poser leurs mains (salissures brunes, plus grasses).

L'ensemble des essais réalisés a permis d'élaborer un protocole de nettoyage associant injection/extraction de vapeur d'eau (Fig.10) et produit biocide à base d'ammonium quaternaire pour les façades extérieures ; et injection/ extraction d'eau froide (Fig. 11) et produit pelable à base de latex sans complexant pour les surfaces intérieures.




Figure 11 : essais de nettoyage par injection-extraction de vapeur d'eau en façade extérieure du mémorial.




Figure 10 : essais de nettoyage par injection-extraction d'eau froide au sol à l'intérieur du mémorial.

Élisabeth Marie-Victoire, responsable du pôle Béton, ingénieur de recherche
Myriam Bouichou, ingénieur de recherche

PÔLE SCIENTIFIQUE Bois

Introduction

Malgré une longue absence du responsable de pôle (près d'un an) sur cette période, on pourra constater que nombre de missions ont été menées à bien. Ceci a notamment été rendu possible grâce à des partenariats efficaces. Les programmes de recherche sur la détection acoustique des insectes à larves xylophages et sur le renforcement de structures bois par tiges collées ont pu connaître de nouveaux enrichissements.

Par ailleurs, ces dernières années, le pôle scientifique Bois s'est largement impliqué dans l'activité des deux associations qu'il a contribué à créer :

- l'Association des entreprises spécialisées dans le renforcement des ouvrages et structures bois par des techniques de résines (RBR) ;
- le groupe Bois-Mobilier de la Section française de l'Institut international de conservation (SFIIC).

Enfin, le nombre d'interventions dans le cadre d'enseignements et de stages de formation, et le nombre d'encadrement de stagiaires ont été enrichis par une expérience à l'université de Bordeaux (enseignement en xylologie du bois niveau licence pro et master).

Les associations et groupes de recherche

En 2013 et 2014, se sont tenues les 4[es] et 5[es] journées du **groupe Bois-Mobilier** de la Section française de l'Institut international de conservation. Cette association a pour objectif d'organiser des journées de travail sur une thématique définie chaque année. Ces réunions doivent permettre des échanges inter-professionnels (conservateurs, restaurateurs, scientifiques) qui pourraient aboutir à un bilan et une harmonisation des techniques et des pratiques en conservation-restauration du mobilier. Ces deux années, les thèmes discutés avaient pour titre « Lorsque nos certitudes sont mises à l'épreuve - Ces objets qui nous surprennent » et « Restauration, reconstitution, copies… les limites des interventions en conservation-restauration ». Chaque année, le public a rassemblé 50 à 60 personnes. Les programmes complets sont consultables sur le blog du groupe : « http://sfiicbois.wordpress.com/ »

L'**Association des entreprises spécialisées dans le renforcement des ouvrages et structures bois par des techniques de résines** (RBR), est abritée par la Fédération de l'industrie bois-construction (FIBC). Le but de cette association est de produire des documents techniques concernant les méthodes de renforcement à la résine. Jusqu'en 2013, cette association a financé pour partie une thèse de doctorat CIFRE suivie en co-tutelle par l'Institut d'ingénierie et de mécanique (I2M, à Bordeaux) et le LRMH.

Le **groupement de recherche « Sciences du bois »** (GDR), est dirigé par Joseph Gril (Laboratoire matériau et génie civil à Montpellier). Les sciences du bois sont actuellement menées par une communauté très diverse par ses disciplines, thématiques et contextes institutionnels. L'objectif du GDR « Sciences du Bois » est de rassembler cette communauté autour de thèmes scientifiques transversaux, tels que les déterminismes des qualités des bois, déclinés de la biologie à l'ingénierie, en passant par les relations structures-propriétés, mais également par des actions de coordination en matière de pédagogie, partage des ressources, relations avec la communauté scientifique internationale et les professionnels.

Les missions du groupement sont les suivantes :

- améliorer la communication entre les groupes impliqués dans des recherches sur le bois, en diffusant l'information sur les projets en cours et thèses engagées ;
- favoriser les transferts de compétences, collaborations inter-équipes et recherches pluridisciplinaires ;
- identifier les verrous et enjeux, et stimuler les recherches dans des directions jugées importantes par la communauté scientifique ;
- contribuer à la visibilité nationale des sciences du bois et servir de relais aux réseaux internationaux.

11 équipes de recherche relevant de l'Institut national de recherche agronomique (INRA), (département EFPA et CEPIA) participent à ce projet, sur 52 équipes au total représentant toutes les institutions nationales (dont la recherche industrielle, le ministère de la Culture et de la Communication) participant à la recherche en sciences du Bois.

LOIGNÉ-SUR-MAYENNE – 53, Mayenne (Pays-de-la-Loire) - Logis seigneurial de Viaulnay, chapelle. Évaluation de la restauration des lambris. (Rapport n° 1343A)

Les lambris de la chapelle de Loigné constituent un ensemble qui a été sauvegardé dans des conditions discutables après avoir été très dégradé sur site. Ces lambris ont fait l'objet d'une étude historique dans les années 90 et un projet de remise en place sur site a été entrepris. Ce projet devait se dérouler en trois phases : phase de restauration du support bois par les Ateliers de la Chapelle ; phase de restauration des peintures dans l'atelier de restauration de Mmes Chauvet et Koltz ; pose sur site.

À la suite des travaux de restauration du support, les choix des produits et procédés utilisés par les ateliers de la Chapelle ont été remis en question par Mme Koltz. Le LRMH a été sollicité pour évaluer *a posteriori* les travaux effectués par les Ateliers de la Chapelle.

Une étude a été menée en grande partie à l'Institut d'ingénierie et de mécanique par des étudiants de l'université de Bordeaux dans le cadre de leur mémoire de fin d'année de master. L'étude expérimentale a permis de montrer, à partir de lambris « équivalents » aux lambris authentiques (même échelle, même essence de bois, même débit) :

- que sur le temps de l'étude, la déformée est relativement faible et inférieure à 7 mm ;
- qu'il est possible de modéliser cette déformée ;
- que la méthode de restauration consistant à doubler le chêne d'origine débité sur quartier avec une planche de balsa collée à la colle de peau diminue sensiblement la déformée (et donc les contraintes) par rapport à la méthode utilisées dans les Ateliers de la Chapelle.





Figure 12 : éléments de lambris revers et face.

Un argument pour l'utilisation du chêne par rapport au balsa est la durabilité naturelle du chêne notamment vis-à-vis des insectes.

Enfin, un calcul simple a permis en première approximation d'affirmer que les contraintes induites par les charges hydriques sur les lambris en place pouvaient être supportées par le système de restauration proposé par les Ateliers de la Chapelle.

Bien qu'il soit toujours très difficile d'être prédictif sur les comportements mécano-sorptifs de planches de bois *a fortiori* lorsqu'elles sont peintes et/ou collées, nous avons conclu à partir des travaux réalisés à l'I2M qu'il n'est pas nécessaire de dérestaurer le travail réalisé par les Ateliers de la Chapelle.

ROQUEBRUNE-CAP-MARTIN (06, Alpes-Maritimes) - Cabanon Le Corbusier. Expertise sur l'état sanitaire



Figure 13 : cabanon Le Corbusier, le 5 décembre 2013.

Plusieurs missions nous ont conduits sur des sites pour effectuer un constat d'état. Notre expertise permet à la maîtrise d'ouvrage d'appuyer éventuellement une demande d'intervention. À titre d'exemple, une expertise a été réalisée sur le cabanon Le Corbusier et sur la baraque atelier attenante. Pour chaque bâtiment, une liste des principales pathologies est présentée et des conseils spécifiques en conservation sont proposés. En conclusion, les interventions urgentes sont listées et les moyens d'intervention sont proposés. Dans ce cas particulier, une mise « hors d'eau » et des préconisations pour un nettoyage de l'intérieur ont été faites. On demandait en plus la mise en place de dispositifs pour mettre à distance les visiteurs.

Emmanuel Maurin, responsable du pôle Bois, ingénieur d'étude

PÔLE SCIENTIFIQUE Grottes ornées

Introduction

Les demandes d'intervention proviennent de l'administration du ministère de la Culture et de la Communication et des propriétaires gestionnaires de sites. Les sites d'art pariétal font l'objet d'un suivi sanitaire qui est réalisé en collaboration avec le pôle Microbiologie du LRMH. Ces suivis incluent des suivis d'aérobio-contamination et de la microflore des sols, associés dans quelques cas au suivi climatique et systématiquement à des suivis géologiques des sols et parois. Plus spécifiquement, les demandes concernant le pôle Grottes ornées ont concerné des thématiques variées telles que le suivi climatique et l'impact des visiteurs sur le climat, l'identification de recouvrements suspects, l'identification de pigments, des tests de produits consolidants et des préconisations concernant les aménagements à mettre en place pour la protection des parois. Les grottes et abris visités, ou les avis rendus sur des dossiers, ces deux dernières années, sont répartis dans dix régions en France (Aquitaine, Bretagne, Corse, Picardie et Poitou-Charentes, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées et Nord-Pas de Calais). À ces demandes se sont ajoutées des interventions concernant la formation des étudiants sur la conservation des sites rupestres au cours d'écoles thématiques sur la conservation de l'art rupestre, ainsi qu'une demande d'expertise auprès du groupe maîtrise d'ouvrage de la grotte de Lascaux.

Études

Site du Roc-aux-Sorciers (Angles-sur l'Anglin, 86, Vienne)

Les pôles Grottes ornées et Microbiologie du LRMH ont réalisé un bilan sanitaire, sur trois jours, du site du Roc-aux-Sorciers en juillet 2014 à la demande de la CRMH Poitou-Charentes, dans le cadre d'un projet de construction de l'extension de la toiture. Ce bilan a consisté en un suivi microbiologique de l'abri Bourdois et de la cave Taillebourg, ainsi qu'un suivi climatique. Cet état sanitaire a été complété par des observations visuelles à l'intérieur et aux abords du site.

Les variations de température de l'air (Fig. 14) à l'intérieur des abris montrent une influence des températures externes plus amorties dans l'abri Bourdois que dans la cave Taillebourg ; ce qui s'explique par la différence des structures protectrices. En effet, pour l'abri Bourdois, il s'agit d'une construction en béton et bois alors que pour la cave Taillebourg, la protection est constituée d'un toit métallique, de piliers en bois et de bâches plastiques. Le pic positif observé le 28/7 à 17 h 15 correspond à la présence de cinq personnes dans l'abri Bourdois et cette anomalie disparait en moins de 2 heures. Le pic positif est très bien expliqué par la présence de cinq personnes dans la cave Taillebourg : visite avec les services de la DRAC le 28/7 à 16 h 15. Cette anomalie thermique est très rapidement absorbée en 15 minutes.

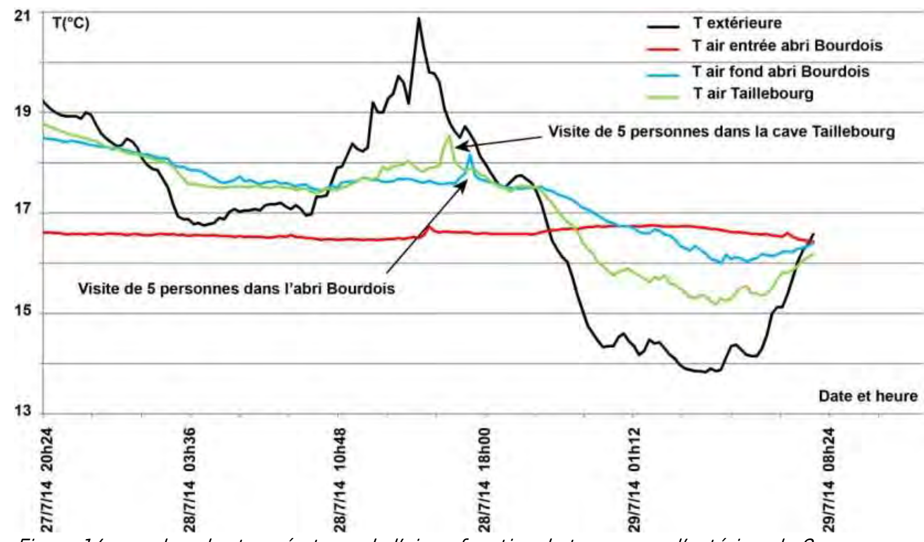


Figure 14 : courbes des températures de l'air en fonction du temps pour l'extérieur, la Cave Taillebourg et l'abri Bourdois.

Sur la frise sculptée, des efflorescences blanches sont présentes (Fig. 15). Les analyses de diffraction des rayons X montrent qu'il s'agit de gypse (sulfate de calcium, Fig. 16) associé à des pertes de matière.

L'étude climatique courte montre donc que les anomalies thermiques engendrées par la présence humaine sont rapidement résorbées, mais de manière différente selon que l'on considère l'abri Bourdois ou la cave Taillebourg. Par ailleurs l'influence de la climatologie externe joue un rôle que ce soit pour l'abri Bourdois ou pour la cave Taillebourg. S'il est nécessaire que la toiture pour la cave Taillebourg soit réalisée dans des matériaux plus durables que les matériaux actuels, une étude plus longue et pérenne permettra de mieux connaître le fonctionnement des deux abris et, de ce fait, d'adapter la toiture.

En effet, des cristallisations de gypse montrent que les deux abris sont soumis à de forts épisodes de condensation et de ruissellement où l'eau active permet des cycles de dissolution/recristallisation de gypse induisant les pertes de matière au niveau des frises sculptées.



Figure 15 : efflorescences blanches sur la frise sculptée de l'abri Bourdois.

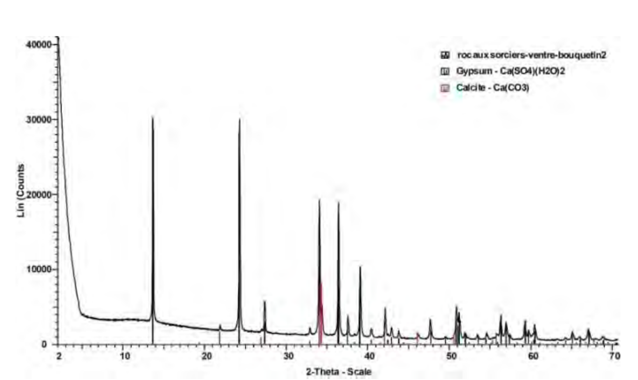


Figure 16 : diffractogramme des efflorescences blanches de la frise.

Grotte de Pair-Non-Pair (Prignac-et-Marcamps, 33, Gironde)

Des analyses en spectrométrie de fluorescence X portable ont été réalisées sur des traces de couleur présentes dans la grotte de Pair-non-Pair, les objets montrant des traces colorées et les boules d'ocre retrouvés dans la grotte au cours des campagnes de fouille, ainsi que sur les objets provenant de l'abri Morin (situé non loin de la grotte de Pair-Non-Pair, mais de période différente) et conservés au musée d'Aquitaine. Ces analyses ont permis d'obtenir les compositions chimiques élémentaires de traces colorées rouges et noires, afin de pouvoir les comparer. Si quelques incertitudes persistent du fait que l'épaisseur des traces sur les parois est variable et que la contribution des éléments chimiques des supports rocheux est non négligeable, ces analyses ont pu être réalisées sans contact et sans prélèvement. Les ocres conservées dans les vitrines de l'accueil de la grotte et au musée d'Aquitaine (Fig. 17 et 18) ont pu être utilisées dans la grotte et/ou sur les objets peints pour les couleurs rouges (Fig. 19 et 20) et certaines zones de couleur noire. Par ailleurs, les traces de couleur sur les objets provenant de l'abri Morin ont des compositions comparables à celles des objets de Pair-non-Pair indiquant très certainement une même source d'approvisionnement.



Figure 17 : ocre 46K conservée au musée d'Aquitaine.

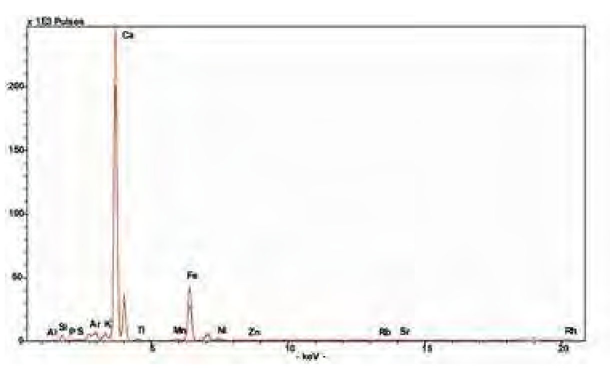


Figure 18 : analyse en spectrométrie de fluorescence X de l'ocre 46K partie rouge.



Figure 19 : trace de couleur rouge au niveau du panneau des cervidés.

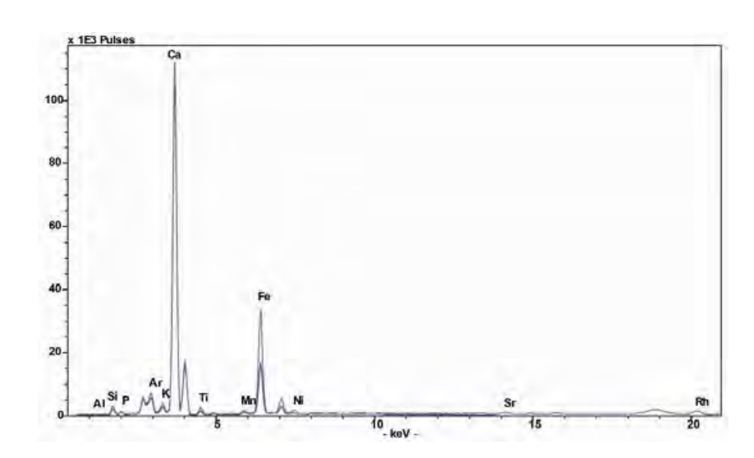


Figure 20 : analyse en spectrométrie de fluorescence X de la trace de couleur rouge au niveau du panneau des cervidés.

Par ailleurs, cette grotte, ouverte au public, a été équipée par le Centre des monuments nationaux, de sondes climatiques permettant de contrôler l'influence des visiteurs sur le climat. Cette cavité étant très épidermique, l'influence du climat externe est très importante (Fig. 21). En revanche, les hausses de températures dues aux visiteurs, que ce soit au niveau des parois ornées (donc dans l'air, (Fig. 22) ou au niveau du sol (température de la roche, (Fig. 23), sont rapidement résorbées.

Aucun phénomène d'accumulation n'est constaté et le retour aux variations thermiques naturelles se réalise. La cavité est donc à l'équilibre d'un point de vue thermique et le nombre actuel de visiteurs acceptés est adapté aux bonnes conditions de conservation de la grotte.

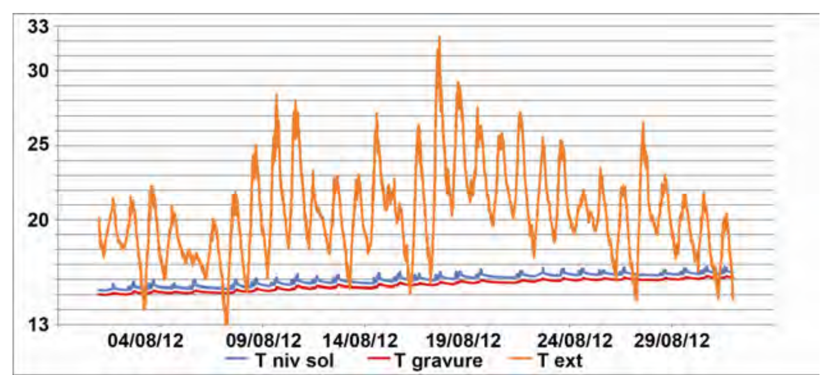


Figure 21 : influence du climat externe sur le climat interne de la grotte de Pair-non-Pair.

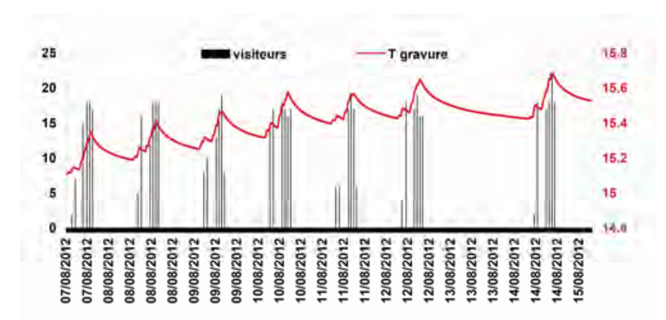


Figure 22 : variations des températures au niveau des parois ornées lors des visites.

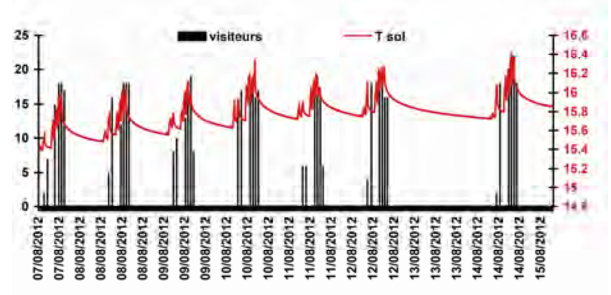


Figure 23 : variations des températures au niveau des parois de la roche lors des visites.

École thématique sur la conservation de l'art rupestre en Amérique Centrale

Cette mission a fait suite à celle réalisée, en 2010, par le pôle Grottes ornées. Ces ateliers sur la conservation de l'art rupestre faisaient partie des « caravanes des savoirs » mis en place par le Centre d'études mexicaines et centraméricaines (CEMCA). Cette mission a été rendue possible grâce au CEMCA ainsi qu'à l'Institut français d'Amérique centrale (IFAC) et l'Institut français d'Amérique latine (IFAL) et le Colegio Franco-Mexicano. Cet atelier consistait en deux jours de cours théoriques sur la conservation de l'art rupestre et trois jours de pratique (nettoyage mécanique de micro-organismes sur roche gravée) sur le terrain au Guatemala et au Nicaragua. Au Mexique deux conférences ont également été données. Philippe Costa, archéologue associé au CEMCA, a assuré la mise en place, la traduction des cours en espagnol, la traduction lors des échanges avec les participants et également la logistique (déplacements, location de matériel, achat de matériel). La mission de 2013 a été réalisée du 26 juin au 22 juillet.

Des cours théoriques sur la conservation de l'art rupestre ont été donnés au Guatemala, à l'université San Carlos (USAC) et au Nicaragua à l'université nationale autonome du Nicaragua (UNAN). Les thèmes abordés ont été les suivants : présentation du LRMH, histoire de la conservation des grottes ornées en France (la grotte de Lascaux, les risques géologiques et climatiques et recherche associée, les risques biologiques et recherche associée, les risques anthropiques) et archéométrie et recherche.

Ces exposés ont permis de poser les bases théoriques de la conservation telle qu'elle est pratiquée en France. Les échanges avec les participants ont été nombreux et se sont poursuivis au cours des journées de pratique sur le terrain. Le nombre de participants dans chaque pays était libre pour les cours théoriques, mais volontairement limité pour la partie pratique à une quinzaine afin que chacun puisse avoir l'opportunité de s'exercer. Les groupes de participants étaient constitués d'étudiants en 5e année d'archéologie, de restaurateurs confirmés, d'enseignants universitaires, de responsables de sites et d'agents des ministères de la Culture du Nicaragua et du Guatemala.

Deux sites au Guatemala ont été choisis pour la partie pratique de l'atelier : la roche gravée de l'Hombre de Monte Sion sur la commune d'Amatitlan et la roche de la Rectoria à l'entrée de l'Université San Carlos (Fig. 24). Au Nicaragua, le parc archéologique de Piedra Pintada localisé sur la commune de Villa Sandino, dans le département de Chontalès a été choisi.



Figure 24 : participants à l'atelier au Guatemala réalisant le nettoyage de la roche de la Rectoria.

Stéphanie Touron, responsable du pôle Grottes ornées, ingénieur de recherche

PÔLE SCIENTIFIQUE Métal

Introduction

Le pôle scientifique Métal du LRMH met tout en œuvre pour mener de front, aussi bien les missions de conseils scientifiques et techniques dans le cadre des chantiers de restauration des monuments historiques, que les programmes de recherche. Au cours de l'été 2013 le pôle a été renforcé par le concours de Myriam Bouichou (pôle béton) car deux gros dossiers devaient être traités dans la même période et sur un délai court.

Depuis un an (novembre 2013), l'arrivée d'un ingénieur d'étude sous contrat, au sein du pôle, a permis d'aider à répondre aux demandes de service toujours plus nombreuses et complexes et de contribuer aux projets de recherche.

Parmi les demandes de service (35 demandes traitées par an), le travail nécessaire en termes de durée, peut être évalué comme ponctuel (5 à 15 jours de travail commun pour l'étude de l'altération de la passerelle de la grotte de Chauvet) ou bien se poursuivre sur plusieurs mois (de1 à 6 mois pour le chantier du Panthéon, de la colonne Vendôme, du château d'Azay-le-Rideau, de la face au miroir du Cyclope de Jean Tinguely).

Concernant les programmes de recherche, nous soulignerons des avancées notables pour la thématique des plombs d'extérieurs (sculptures et couvertures), notamment favorisées par l'ouverture de certains chantiers (restaurations de l'Archange de la Sainte-Chapelle, d'un épi de faîtage à Romorantin, des toitures de la cathédrale de Beauvais et du château d'Azay-le-Rideau). Ces recherches doivent également leurs progrès à la collaboration avec le laboratoire LISE sur l'altération des plombs, et avec Anna Zymla (ancienne enseignante de l'École centrale de Paris), ainsi qu'aux analyses de la polychromie de bavettes de faîtages du Moyen Âge menées en interne. L'activité du programme de recherche sur la protection des alliages cuivreux en extérieur doit également être rapportée : notre partenariat établi avec le LAPA, dans le cadre d'une thèse financée par le labEx PATRIMA (Emilande Apchain), devrait permettre d'approfondir les résultats issus des précédentes recherches menées au LRMH et de contribuer à une meilleure compréhension des problématiques soulevées (patines et protections par les cires microcristallines et les vernis).

Les années 2013-2014 ont également vu la publication de travaux réalisés en particulier sur l'analyse et l'étude des plombs de couverture de la cathédrale de Beauvais.

L'activité d'enseignement du pôle concerne aussi bien la dispense de cours sur les métaux dans le patrimoine (cf. p. 164) que l'encadrement d'étudiants dans le cadre de leur mémoire (cf. p. 167).

Au cours des années 2013 et 2014, le pôle Métal s'est également consacré, en partenariat avec la SFIIC et l'ICOMOS, à l'organisation de la conférence internationale « Métal à ciel ouvert : la sculpture métallique d'extérieur du XIXe au début du XXe siècle – Identification, conservation, restauration » (décembre 2014, Paris), ainsi qu'à la publication de ses actes.

Enfin notons que le pôle Métal participe au bon fonctionnement du laboratoire en veillant à l'entretien, au remplacement, ou bien à l'achat d'appareils qui lui sont propres ou en commun avec les autres pôles ; l'objectif étant de pouvoir travailler efficacement et dans les meilleures conditions aussi bien en laboratoire que sur le terrain.

.

Colloque « Métal à ciel ouvert »

Le pôle métal du LRMH est à l'origine de l'organisation d'une conférence internationale sur le projet de conférence. En partenariat avec la SFIIC et l'Icomos, et en collaboration avec d'autres organismes (C2RMF, INHA, A-Corros, Ch Degrigny), ce projet a pris forme tout au long des années 2013-2014 ; il comprend l'organisation du colloque et la publication de ses actes (15e publication de la SFIIC).

L'objectif de cette conférence s'axe sur la rencontre et l'échange entre les différents acteurs de la conservation-restauration des sculptures métalliques d'extérieur datant du XIXe au début du XXe siècle. Il s'agit de faire le point sur les connaissances, mais aussi de confronter les différents points de vue, approches ou solutions adoptées, ainsi que les résultats obtenus. Les thèmes abordés concernent : la restauration et la conservation ; la conservation préventive ; les matériaux : composition, altération, impact de l'évolution industrielle et les artistes ; les fondeurs : historiques et techniques.





Appels à communication	Notification	Soumission articles	Conférences	Excursions
28 février 2014	20 mars 2014	30 juin 2014	4 et 5 déc 2014	6 déc 2014
Limite de soumission du résumé + fiche renseignements	Acceptation /refus par le comité scientifique	Articles pour publication		Monuments parisiens (en option)

Études

Étude préalable à la restauration de la colonne Vendôme, Paris 1er (75) (Rapport n° 1364A, en cours)

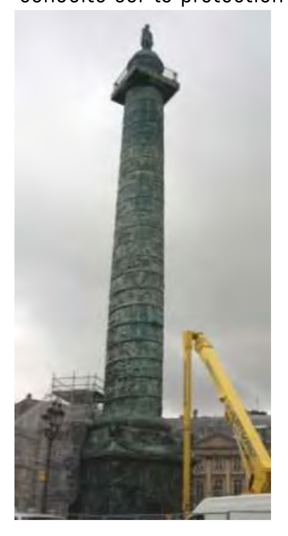
À la demande de la direction régionale des affaires culturelles d'Île-de-France et de Christophe Bottineau, architecte en chef des monuments historiques, le pôle métal du LRMH est intervenu, au cours des années 2013 et 2014 dans le cadre du projet de restauration de la colonne Vendôme à Paris (mécénat Ritz). La colonne Vendôme fut fondue à partir de canons pris à l'ennemi lors des Guerres napoléoniennes. Elle a été érigée la première fois en 1810 avant d'être détruite puis reconstruite à la fin du XIXe siècle et n'aurait pas subi d'intervention jusqu'à aujourd'hui. Au cours de ces différentes phases de travail nous avons pu accompagner l'architecte et les équipes de restaurateurs en mettant à leur disposition notre expérience sur la restauration des œuvres métalliques exposées en extérieur (Fig. 25).

Dans un premier temps, au cours de l'avant-projet, nous avons pu avec l'architecte comprendre ce monument et évaluer la mauvaise qualité de certaines plaques le composant. Des défauts de surface et la présence sur l'œuvre d'une forme d'altération noire, très fine, dure et adhérente au support, pouvant être complexe à gérer au moment des nettoyages ont été repérés. Une campagne d'essais proposés par le LRMH a permis de réaliser différents tests de nettoyages (entreprise ECMH) et de caractériser les altérations de surface en fournissant des informations analytiques et techniques sur l'ensemble des problématiques rencontrées. Ainsi, plusieurs états de surface ont été mis en évidence dont certains se sont avérés particuliers et inhabituels (patine noire indurée, probablement volontaire que l'on différencie des croûtes noires résultant des dépôts de pollution). En outre, de nouvelles techniques de nettoyage (cryogénie, média plastique) et traitements de surface ont été testés avec l'objectif de conserver la patine naturelle tout en améliorant la lisibilité de l'œuvre et de respecter des règles environnementales spécifiques à l'emplacement de la colonne.

Dans un deuxième temps, le LRMH a poursuivi son rôle d'assistance à la maîtrise d'œuvre en participant à la rédaction de la partie technique de l'appel d'offre et depuis août 2014, aux réunions de chantier afin d'ajuster le degré de nettoyage en fonction des différentes surfaces identifiées, avec l'objectif

d'homogénéiser l'aspect visuel général de la colonne tout en conservant la lisibilité des scènes historiques. Il s'agissait aussi de mener une réflexion sur les méthodes de patine et de protection pouvant être employées pour pérenniser cette opération.

Ajoutons enfin que dans le cadre d'une recherche conduite sur la protection des bronzes (thèse PATRIMA en partenariat avec le CEA et le C2RMF, 2014-2016), des prélèvements des différentes patines observées ont été réalisés. Il s'agira de contribuer à une meilleure connaissance de la structure et de la composition des patines des alliages cuivreux formées en environnement extérieur en vue de proposer des traitements de protection adaptés.





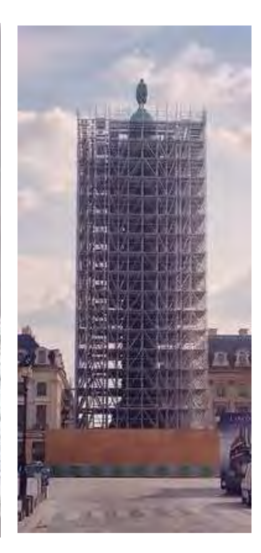


Figure 25 : à gauche, colonne Vendôme, place Vendôme, Paris 1er (75), avant restauration.
Au milieu, mise en évidence de différents états de surface sur les plaques de bronzes, avec, en particulier la patine noire indurée. À droite, mise en place du chantier de restauration de la colonne Vendôme.

Restauration de l'archange de la Sainte-Chapelle, Paris 4e (75) (Rapport n° 1366A, en cours)

À la demande du Centre des monuments nationaux et de Christophe Bottineau, architecte en chef des monuments historiques, le pôle Métal du LRMH est intervenu, au cours des années 2013 et 2014 dans le cadre du projet de restauration de l'Archange ornant le chevet de la toiture de la Sainte-Chapelle de Paris. L'œuvre monumentale (2,90 mètre de haut) en plomb réalisée en 1852 avait été déjà une fois restaurée par les ateliers Monduit en 1939. Elle était déposée depuis 2004 pour des raisons d'instabilité (Fig. 26).

Dans le cadre de notre expertise, une série d'examens (fluorescence X portable et LIBS *in situ,* diffraction des rayons X et analyses MEB-EDS sur prélèvements) a tout d'abord été mise en œuvre afin de réaliser un état sanitaire ainsi qu'une identification des matériaux constitutifs de cette sculpture et de sa base concernant :

- la « peau » de plomb : identification des assemblages d'origine, des réparations, des différents états de surface (faciès de corrosion, croûtes), des restes de recouvrement de surface de type patine ou peinture ;

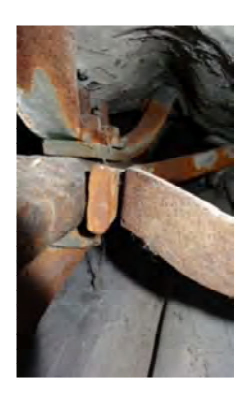


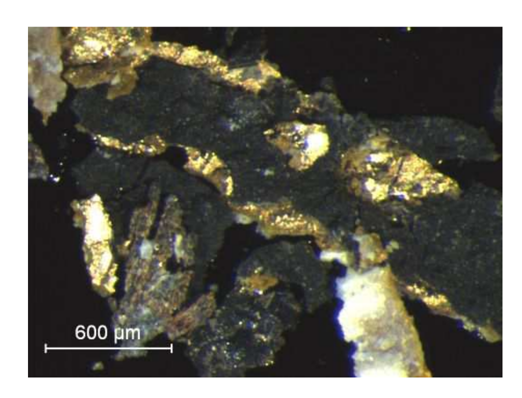
Figure 26 : Paris, Sainte Chapelle, Archange en plomb ornant le chevet.

- la structure métallique interne : identifiée comme armature d'acier galvanisé dont le recouvrement en zinc était quasiment consommé, « crinolines en bronze », pattes de maintien en cuivre (Fig. 27) ;

- la localisation et identification des décors de surface : la sculpture présentait des rehauts blancs, noirs et des restes de dorure. La préparation pour la dorure (apprêt) fut élaborée à base d'ocre et de jaune de chrome (FIG. 28). Les tracés noirs contiennent de la magnétite et du noir d'os tandis que les blancs résultent très certainement de l'application de pigments à base de plomb (céruse, litharge).

Notons que la base et le lanternon ont également fait l'objet d'analyses, nous permettant ainsi de documenter leurs matériaux d'élaboration et de décor. Un croisement avec les données historiques (archives et photographies) a contribué à une meilleure identification des étapes de la vie de l'œuvre même si certains aspects demeurent encore incertains. Le LRMH a pu rendre compte des résultats produits par ces examens lors des différentes réunions de chantier, ce qui a permis d'accompagner les réflexions menées sur le choix des méthodes de nettoyage, sur le type de protection de l'armature interne à adopter et sur le degré de réhabilitation des surfaces et des décors.





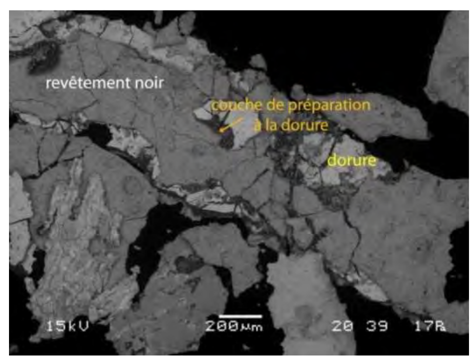


Figure 27 : à gauche, structure interne (armature en fer, crinoline en bronze) de l'Archange. Figure 28 : à droite prélèvement de décor polychrome (noir et dorure) : image en microscopie optique et image en microscopie électronique à balayage.

Annick Texier, responsable du pôle Métal, ingénieur de recherche
Aurélia Azéma, ingénieur d'étude

PÔLE SCIENTIFIQUE Microbiologie

Introduction

Le pôle scientifique Microbiologie est un pôle mixte qui répond aux demandes émanant du service du patrimoine, du service des archives de France ainsi que du service des musées de France. Ces dernières demandes sont, d'ailleurs, de plus en plus nombreuses. Les demandes provenant des responsables de grottes ornées sont également en augmentation. En effet, le pôle Microbiologie assure le suivi de l'aérobiocontamination de grottes comme celles de la région Languedoc-Roussillon, Aquitaine, etc. Enfin, l'Institut royal du patrimoine belge a sollicité l'aide du pôle Microbiologie pour le suivi sanitaire des minières néolithiques de Spiennes classées patrimoine mondial par l'Unesco. Ce pôle répond régulièrement à des demandes d'interventions ponctuelles d'urgence, suite à des contaminations microbiologiques accidentelles. Ces demandes peuvent concerner tout type de matériau sensible aux attaques biologiques (pierre, bois, textile, peintures murales, etc.). D'autres demandes concernant, soit des demandes d'études préalables à la restauration, soit des chantiers de restauration en cours sont également traitées.

L'année 2013 a été particulièrement chargée en intervention. En particulier, après l'incendie de l'hôtel Lambert (Fig. 29), le pôle Microbiologie a été sollicité pour aider le maître d'œuvre à gérer un éventuel développement anarchique de moisissures sur les œuvres. Ce site a été suivi pendant une année, par des échanges hebdomadaires sur les actions à mettre en œuvre, avec le cabinet d'architecte en chef chargé de la restauration de cet édifice.



Figure 29 : les pompiers à l'œuvre pour éteindre l'incendie qui a frappé l'hôtel Lambert, le 10 juillet. (Photo AFP).

Les problèmes de développement de basidiomycètes sur le bois, qui nécessitent expertise et établissement de protocoles de traitement, représentent les types de sollicitation les nombreuses et correspondent à une de nos compétences spécifiques.

Ainsi entre fin 2012 et fin 2014, plus de 100 demandes d'intervention (analyses, identifications et conseils) ont été satisfaites par le pôle.

Notre activité de recherche maintient une attention particulière à la mise au point de nouvelles méthodes alternatives aux traitements chimiques, comme l'utilisation des propriétés germicides de la lumière artificielle pour l'éradication des micro-organismes chlorophylliens. En outre, nous continuons à nous intéresser à l'aspect préventif de la conservation en travaillant sur les moyens d'anticipation des contaminations grâce à la détection des COVm (composés organiques volatils microbiens).

D'autres projets ont été également poursuivis ou achevés au cours de ces deux dernières années, comme le programme du Cercle des partenaires du patrimoine sur *L'étude et la compréhension de la dynamique de colonisation microbienne des supports*, ou encore un programme en cours dans le cadre de l'Action transversale Museum sur l'*Analyse génomique de la diversité microbienne d'une grotte ornée,* avec le Muséum national d'histoire naturelle.

Au cours de l'année 2014, le pôle Microbiologie a participé à l'organisation d'une journée de recherche et d'un colloque :

- Journées Recherche Industrie Microbiologie, du 7 au 9 octobre 2014 à Narbonne sur le « Management des ressources microbiennes » ;
- 1st European Conference on « Biodeterioration of Stone Monuments » – 7 novembre 2014 à Cergy-Pontoise.

Concernant le volet « formation », les enseignements, l'encadrement de doctorants, de post-doctorants et de stagiaires sont une part importante de notre activité.

Le départ en retraite, en mars 2013, de Geneviève Orial, a créé une période de transition difficile à cause de la forte augmentation de la charge de travail. En mars 2014, l'intégration au sein du pôle de Johann Leplat, microbiologiste sous contrat, a permis une meilleure répartition des activités.

Il est à noter que deux scientifiques du pôle Microbiologie sont également des agents de prévention. Ils assurent une mission d'assistance auprès du chef de service pour la mise en place des mesures d'hygiène et sécurité, avec entre autre la rédaction du document unique du LRMH.

NANCY – 54, Meurthe-et-Moselle (Lorraine) Muséum-Aquarium, réserves. Identification de la contamination biologique et préconisations de mesures de conservation (Rapport n° 1361A)

Le Muséum-Aquarium de Nancy (MAN) (FIG. 30) stocke dans une réserve une collection géologique et paléontologique très importante. Cette collection, d'environ 50 000 pièces, avec notamment des roches, des os et des fossiles, appartient à l'École nationale supérieure de géologie (ENSG) de Nancy. Elles sont réparties dans 84 armoires empilées deux à deux et dans des « caisses à munitions ». La réserve se trouve sous l'amphithéâtre du muséum. Elle est accessible par un escalier et des couloirs assez larges, et n'est pas isolée du reste du bâtiment.



Figure 30 : vue générale du Muséum-Aquarium de Nancy.

Sur la majorité des échantillons de la collection ainsi que sur les meubles de stockage, des développements de moisissures ont été constatés.

Les objets de la collection doivent être transférés vers une nouvelle réserve externalisée. Avant le transfert et afin de ne pas contaminer la nouvelle réserve, les objets devront être traités, nettoyés et reconditionnés.

Une odeur forte de moisi a été constatée à l'entrée de la réserve. Pour quantifier le nombre de bactéries et de champignons présents dans l'air de cette réserve, des prélèvements d'air ont d'abord été réalisés.

Ensuite une inspection visuelle du site a été effectuée. La première observation a montré la présence de taches et des recouvrements duveteux (FIG. 31) de différentes couleurs (blanches, grises, vertes, etc.) sur les meubles et sur les objets.



Figure 31 : duvet blanc sur les oursins.

Des prélèvements par frottis ont été réalisés pour identifier les agents responsables de ces recouvrements. Une évaluation des taux de micro-organismes en suspension dans l'air a été également effectuée.

Les analyses microbiologiques confirment que les recouvrements constatés sur les collections de la réserve du Muséum-Aquarium de Nancy sont bien d'origine fongique. Les résultats des prélèvements d'air ont montré la présence de spores fongiques en quantité importante sur l'ensemble des points. Le taux de bactéries dans l'air est faible (FIG. 32).

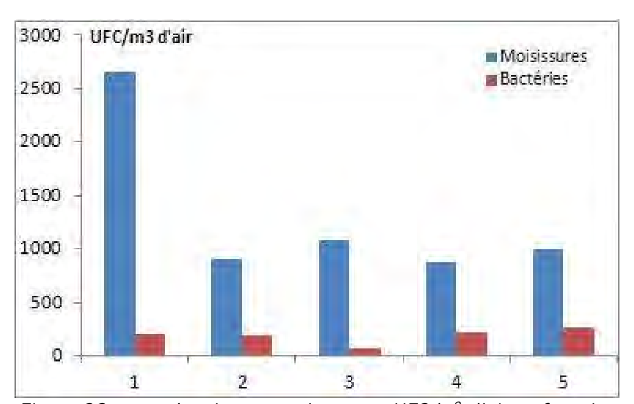


Figure 32 : taux de micro-organismes en UFC/m³ d'air en fonction de la localisation

Sur les milieux de culture, des colonies de *Penicillium sp*, *Aspergillus sp*, *Verticillium sp* et *Cladosporium sp* ont été identifiées. La réalisation d'un antibiogramme sur les souches identifiées a permis de choisir le biocide le plus efficace. Le traitement biocide ainsi que les différentes techniques de mise en œuvre ont été proposés au responsable du site.

Faisl Bousta, responsable du pôle Microbiologie par intérim, ingénieur d'étude
Johann Leplat, ingénieur de recherche
Alexandre François, technicien de recherche

PÔLE SCIENTIFIQUE Peintures murales et polychromie

Introduction

Le pôle Peintures murales et polychromie est composé d'un ingénieur de recherche, de deux ingénieurs d'études, d'un assistant-ingénieur et d'un technicien de recherche. Cependant la situation du pôle reste fragile car un agent est en congé parental depuis plus d'un an. D'autre part, l'un des agents est correspondant informatique chargé de la maintenance et de la surveillance du réseau et des postes informatiques. Il joue le rôle d'interface entre les services informatique du ministère de la Culture et de la Communication, le prestataire extérieur et les agents du laboratoire, et participe à la réorganisation aussi bien logicielle que matérielle de toute l'informatique du laboratoire ce qui lui prend évidemment un temps non négligeable de son activité.

Le contexte d'intervention du pôle s'est modifié avec le positionnement du LRMH dans le contrôle scientifique et technique de l'État sur les restaurations des monuments historiques. La nature des demandes et le périmètre d'intervention a changé et la nature des réponses à apporter également.

Le pôle s'est engagé dans l'utilisation croissante, pour le service, d'instrumentation portable ce qui change également la méthodologie d'intervention. L'idée est de pouvoir répondre au plus près aux questions des demandeurs, sur les chantiers et de minimiser les temps de réponse. Cependant cela accroît les temps de déplacement et demande un travail plus important d'intégration des instrumentations, de préparation et de réalisation de l'environnement, en termes de création de base de données par exemple.

Ceci est prolongé par un gros projet de recherche, l'ÉquipEx Patrimex dont l'un des objectifs est d'offrir une plate-forme mobile performante pour la caractérisation de tous types de patrimoines. Le pilotage de cette plate-forme est confié au LRMH. L'ensemble du pôle est engagé dans ce travail et quelques exemples de réalisation sont présentés dans ce rapport scientifique.

Des dossiers importants ont été traités tout au long de la période 2013-2014 :

- études de la polychromie de la nef de la cathédrale de Chartres (28) ;
- *Mise au tombeau* de l'église Lemenc de Chambéry (73);
- clôture de chœur de la cathédrale Sainte-Cécile d'Albi (81) ;
- peintures catalanes de l'église d'Ourjout à Bordes-sur-Lez ; (09) (Fig. 33) ;



Figure 33 : église d'Ourjout-peintures catalanes découvertes sous badigeon.

- chapelle Saint-Martial du Palais des Papes à Avignon (84) ;
- maisons La Roche-Jeanneret de Le Corbusier à Paris 16e (75) ;
- hôtel Lambert à Paris 4e (75) ;
- villa Savoye à Poissy (78) ;
- polychromie des orthostates du cairn de Gavrinis à Larmor-Baden (56) ;
- polychromie de la voûte de l'église Saint-Étienne de Corbeil-Essonne (91) ;
- clé de voûte de la cathédrale Saint-Denis (93) ;
- *Onction du corps du Christ* de l'église Saint-Nicolas de Neufchâteau (88) ;
- le retable de l'église Saint-Barthélémy de Labosse (60) …

Enfin le pôle est engagé dans des programmes européens et nationaux, s'investit dans la formation des acteurs du patrimoine et des futurs acteurs, à travaux de l'encadrement d'étudiants de différents niveaux ainsi que dans l'accompagnement de la formation par la recherche (thèses de doctorat).

Des programmes internes sont en cours de réalisation pour favoriser l'utilisation de la DRX pour les problématiques de peintures murales et de polychromie. Par ailleurs, de nouvelles méthodologies d'utilisation de la cartographie IRTF sont en cours d'étude. Une nouvelle approche pour la réalisation des sections polies se fait jour et le pôle devrait s'investir, grâce au programme EquipEx dans l'utilisation de la technique Raman afin de gagner, là aussi, en efficacité.

Chartres (Eure, 28) – Cathédrale Notre Dame, nef, premières travées, baies hautes peintes en trompe-l'œil ; caractérisation de la polychromie (XIIIe siècle) par LIBS. (Rapport n° 1261B)

Des peintures murales du XIIIe siècle ont été mises au jour lors de la restauration intérieure de la cathédrale Notre-Dame de Chartres (massif occidental). Elles représentent 4 roses à l'intérieur desquelles figurent des anges musiciens imitant des vitraux (Fig. 34).

Des analyses *in situ* ont été programmées en juin 2011 afin de caractériser les couches picturales. Ainsi, la technique d'ablation laser (LIBS) développée au LRMH et l'appareil portable de diffraction et fluorescence des rayons X (pDRX/FX), mis au point par le C2RMF, ont permis d'identifier les matériaux des couches picturales tout en démontrant l'intérêt du couplage de telles analyses (Fig. 35).

Le principe de la LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) repose sur l'interaction laser/matière de haute énergie. Le faisceau laser est focalisé sur la surface de l'échantillon, la matière est vaporisée puis ionisée. Les ions ou les atomes excités vont retourner à l'état initial (transitions électroniques) en créant des émissions optiques (longueur d'onde). Ces photons sont collectés et permettent de connaître la composition élémentaire de la zone analysée. L'étude stratigraphique des couches picturales peut être obtenue en répétant la mesure, profitant alors de la micro-ablation générée par la mise en œuvre du laser et en utilisant un traitement du signal adapté (Standard Normal Variate).



Figure 34 : Chartres (28), cathédrale. Rose sud-ouest. Crédit photographique : François Lauginie

La diffraction des rayons X consiste à envoyer des rayons X très énergétiques sur l'échantillon avec un angle incident définie pour être ensuite diffracter par la structure cristalline du matériau. Les angles diffractés sont récoltés et permettent de connaître la maille de la structure et l'organisation des éléments. En faisant varier l'angle incident, on peut ainsi reconstituer le réseau cristallographique complet de l'échantillon. La connaissance des éléments chimiques (par le biais d'une fluorescence X par exemple) aide à l'identification des structures cristallines. Très souvent, cette technique d'analyse permet de définir la forme (hydratée, altérée, etc.) des matériaux cristallins.

Les pigments identifiés lors de cette campagne d'analyse sont caractéristiques de la période supposée de ces peintures murales (XIIIe siècle).

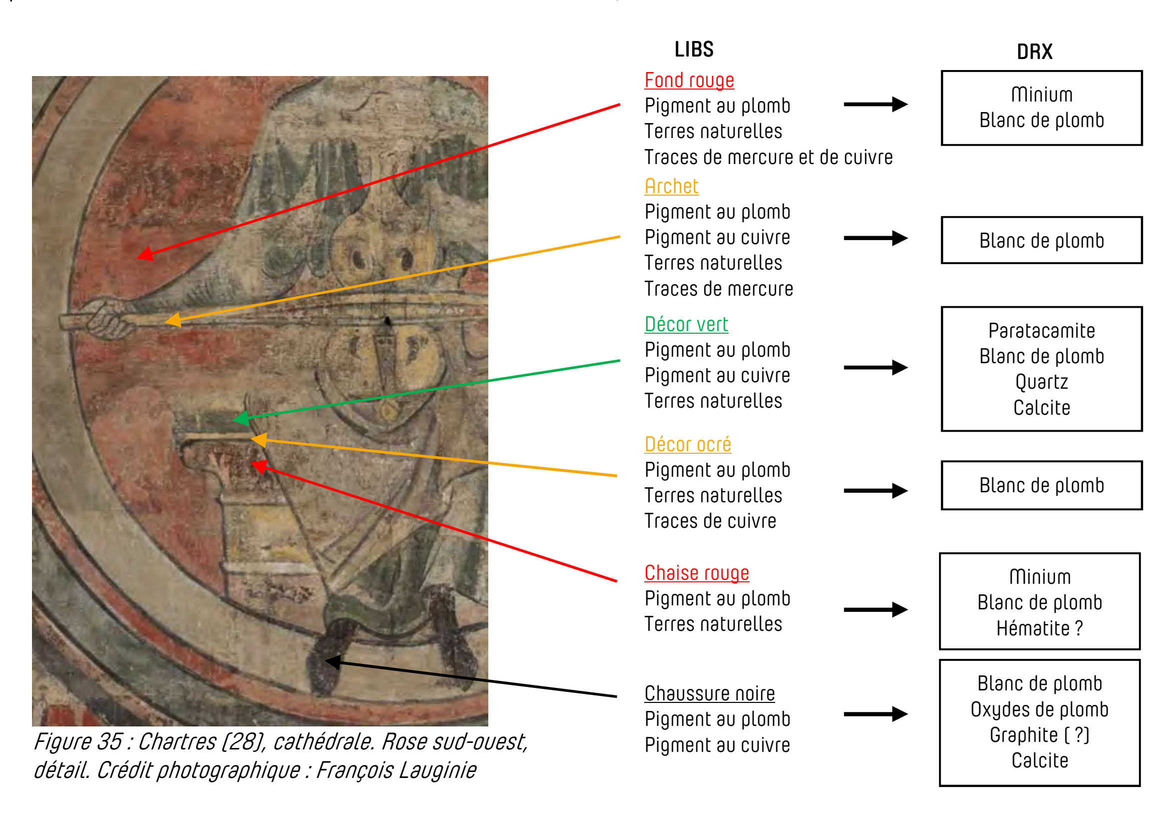


Figure 35 : Chartres (28), cathédrale. Rose sud-ouest, détail. Crédit photographique : François Lauginie

Salisbury (Royaume –Uni). Église Saint-Thomas. Campagne d'imagerie térahertz sur les peintures murales

Le système térahertz a été développé dans le cadre de programme européen CHARISMA, d'abord par le C2RMF, puis repris par le LRMH. Le système térahertz, non destructif, permet une visualisation des sous-couches du fait d'une réflexion différenciée en temps de l'onde térahertz émise. Le retard de l'écho dépend des propriétés optiques des matériaux rencontrés et de leur profondeur.

Une collaboration de longue date existe autour du programme térahertz avec l'université de Reading (Royaume-Uni).

Dans le cadre de l'étude préalable à la restauration d'une peinture murale conservée dans l'église Saint-Thomas de Salisbury au Royaume-Uni, le LRMH a été sollicité pour effectuer une campagne d'imagerie à l'aide du système térahertz. Cette peinture, qui représente le Jugement dernier, est située sur l'arc séparant le chœur de la nef. Elle est de facture assez récente et l'étude des sources documentaires révèle qu'elle pourrait masquer une peinture plus ancienne réalisée au XVe siècle. Celle-ci aurait été masquée par plusieurs couches de badigeon avant d'être dégagée puis restaurée, ou plutôt totalement repeinte par Clayton et Bell dans les années 1880. La peinture est dans un état de conservation satisfaisant malgré un encrassement généralisé, quelques pertes d'adhésion au substrat et quelques lacunes. La présence d'une couche picturale sous-jacente est visible sous les lacunes et semble confirmer la présence d'une composition antérieure (Fig. 36b). Dans la perspective de restaurer l'œuvre, le conseil de fabrique, en sa qualité de maitre d'ouvrage a souhaité compléter l'étude technique par des analyses scientifiques afin d'identifier de façon plus précise la composition sous-jacente.Des mesures ont été effectuées sur différents personnages, éléments architecturaux ou végétaux ; la partie senestre de l'auréole du Christ est particulièrement intéressante car elle contient de la feuille d'or, élément métallique dont la réflexion aux ondes térahertz est importante. Ainsi, l'image obtenue après traitement des données térahertz présente deux tracés à forte réflexion. La comparaison avec l'image visible permet de différencier une première zone correspondant au motif doré observé en surface alors que la seconde, située à environ 100 µm de profondeur semble correspondre à un tracé de même type avec un léger décalage (Fig. 37).

Un prélèvement effectué dans cette région d'intérêt a permis d'effectuer une coupe stratigraphique et de confirmer la présence d'une couche picturale sous-jacente (Fig. 38). Cette dernière, réalisée sur une couche de badigeon de chaux, comporte une couche de préparation de couleur rose, une couche rouge composée d'ocre rouge et de minium et une feuille d'or située à environ 100 µm de profondeur, c'est-à-dire à la même profondeur que la couche présentant une forte réflexion aux ondes térahertz. Une couche de badigeon de chaux recouvre l'ensemble. La composition superficielle comprend une couche de couleur noire et une couche dorée.



Figure 36 : (a) Photographie du Jugement dernier (The Royal Commission of Historic), (b) détail de la surface avec traces visibles de dessin sous-jacents.

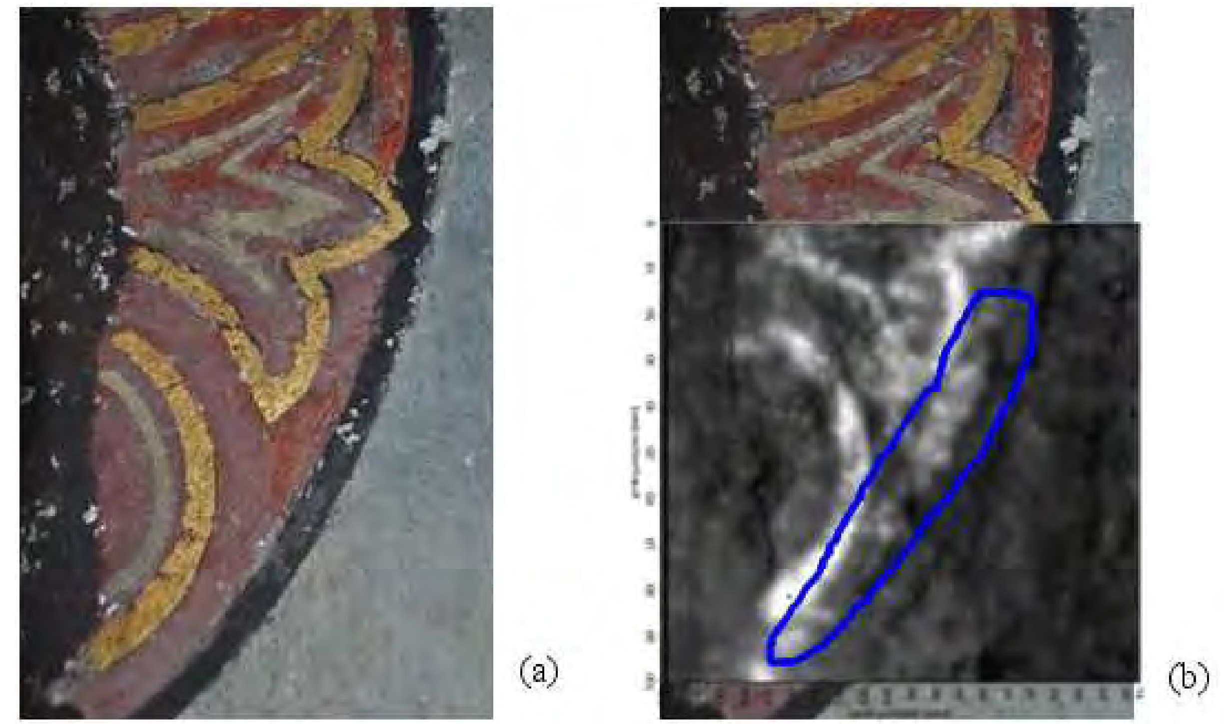


Figure 37 : (a) photographie de la section senestre de l'auréole de Jésus-Christ. (b) Superposition de la section senestre précédente avec l'imagerie pic à pic térahertz obtenue. La zone en bleu est significative d'une forte réflexion sous la surface.

Cette étude a permis de vérifier de façon non-destructive l'existence d'une composition sous-jacente et la présence d'une feuille métallique. Celle-ci présente un tracé comparable au motif visible en surface malgré un léger décalage. Ces résultats ont été confirmés par l'analyse stratigraphique qui montre l'existence d'une couche de badigeon entre les deux couches picturales. En outre, la nature de la couche métallique a été identifiée comme étant de l'or.

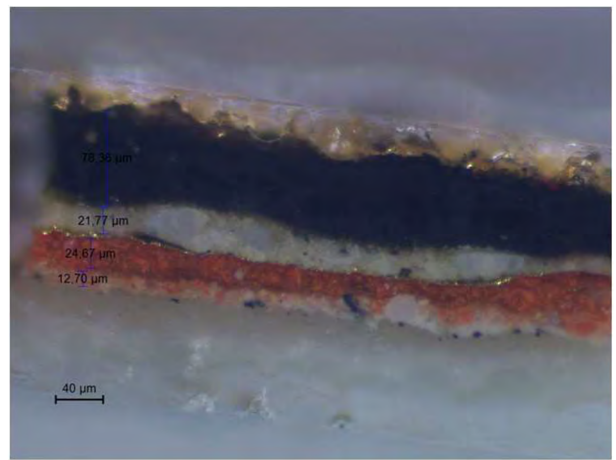


Figure 38 : coupe stratigraphique d'un échantillon prélevée sur la zone visible de la figure 37.

Au vu de ces résultats, il apparaît que l'intervention de 1881 par Clayton et Bell semble avoir été réalisée sur le modèle de la peinture médiévale.

Cette étude a été menée en étroite collaboration avec Peter Martindale, restaurateur, John Bowen et Gillian Claire Walker de l'université de Readings.

Bibliographie : Peter Martindale « The Doom paintings over the chancel arch the late fifteenth century, and the 1881 repaint by Clayton and Bell. Detailed condition report », Internal report, mars 2012.

Vincent Detalle, responsable du pôle Peintures murales et polychromie, ingénieur de recherche
Didier Brissaud, ingénieur d'étude
Stéphanie Duchêne, assistant-ingénieur
Dominique Martos-Levif, ingénieur d'étude
Barbara Trichereau, technicien de recherche

PÔLE SCIENTIFIQUE Pierre

Introduction

Constitué de cinq géologues et pétrophysiciens de spécialités différentes, le pôle Pierre forme une équipe dont les compétences complémentaires permettent de prendre en charge une activité de service importante et diversifiée, et de couvrir de larges champs de recherche. Ce savoir-faire est ancré sur de solides bases de connaissances quant aux problématiques de restauration et de conservation de la pierre, développées depuis les années 1940 au Centre de recherche des monuments historiques alors basé à Chaillot, par quelques géologues préfigurant le pôle Pierre. Cette équipe développe son activité en grande partie à l'extérieur du laboratoire, au service des professionnels du patrimoine, tout en mettant ses compétences à la disposition des autres pôles du LRMH (réalisations de lames minces, assistance technique…).

En dehors de la recherche, le pôle Pierre du LRMH répartit depuis 1970 son activité sur deux domaines : d'une part l'identification et la recherche de provenance des pierres en œuvre, et d'autre part la conservation des maçonneries, de la sculpture monumentale et des mortiers. Au cours des 5 dernières années, le pôle a également su élargir ses compétences pour intégrer les problématiques soulevées par la conservation des architectures de terre crue.

Les demandes relatives à l'identification et à la provenance géographique des pierres émanent essentiellement d'architectes, d'entreprises de restauration et de restaurateurs indépendants, mais aussi d'historiens d'art, archéologues et conservateurs. Ces déterminations apportent aux maîtres d'œuvre des réponses sur les matériaux d'origine, sur les restaurations passées, sur les pierres de substitution à prévoir, et enfin sur les éventuelles altérations intrinsèques observées. Ces identifications sont en partie possibles du fait de l'existence au LRMH d'une lithothèque alimentée depuis 1940, et qui rassemble à ce jour environ 6 000 échantillons issus de carrières et de monuments, de la France entière. Cette activité du pôle Pierre comprend des études de monuments ou de sculptures *in situ,* et des analyses ponctuelles de prélèvements en laboratoire. Il faut y ajouter des études réalisées sur des œuvres monumentales conservées en musées, ainsi que des expertises d'œuvres faisant l'objet d'une demande d'exportation auprès de la direction générale des Patrimoines. La prospection de terrain, dans des carrières en activité ou abandonnées, est le pendant indispensable à ce savoir-faire. Ainsi entre fin 2012 et fin 2014, plus de 60 demandes d'identification ont été satisfaites, et une dizaine de sites carriers ont été prospectés.

Les problèmes de conservation les plus couramment traités concernent le diagnostic des altérations (notamment par les sels), le nettoyage, le dessalement, la consolidation, la protection hydrofuge et antigraffiti de la pierre, la prise d'empreinte, ainsi que la caractérisation des pathologies et les solutions à apporter face aux incompatibilités pierre/mortiers de réparation et pierre/pierre dans un environnement architectural donné.

L'équipe est impliquée dans la formation universitaire et post-universitaire des restaurateurs, architectes, scientifiques en conservation, en France et à l'étranger (cf. p. 164). Les agents du pôle Pierre participent aussi à de nombreux groupes de travail : Comité européen de normalisation (CEN), comités internationaux « Pierre » et « Terre » du Comité international pour la conservation des monuments et sites (Icomos-ISCEAH et -ISCS), groupe « Pierre-Plâtre-Terre » de la section française de l'Institut international de conservation (SFIIC), commission « Pierre Durabilité » du Centre français anti-corrosion (CEFRACOR)…, et apprécie de partager son expérience dans le cadre d'événements et ouvrages de médiation grand-public.

Les années 2013-2014 ont été marquées par une recrudescence des demandes de service et d'études sur les monuments. De nouvelles demandes ont également émergé concernant la conservation des sites archéologiques. Ceci est au moins en partie lié à l'intégration des nouvelles réglementations liées à la réforme de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre. Celle-ci, initiée en 2009 avait quelque peu désorienté les interlocuteurs du LRMH pendant quelques années.

Cet aperçu est complété par quelques exemples concrets d'activités : les études sur la façade sur jardin de l'hôtel de Rohan à Paris, la façade occidentale de la cathédrale Sainte-Marie d'Auch (Gers), le site archéologique de Bibracte (Saône-et-Loire), et enfin la formation organisée en octobre 2014 par le pôle sur les méthodes simples de diagnostic pour la pierre et les mortiers.

Paris 3e - Île-de-France - Hôtel de Rohan, quadrilatère Rohan-Soubise - Façade sur cour - Inspection à la nacelle et analyse de prélèvements dans le cadre de l'étude de programmation. (Rapport n° 429B)

Dans le cadre d'une étude de programmation, la façade sur jardin de l'hôtel de Rohan a fait l'objet d'une inspection à la nacelle destinée à appréhender la diversité des matériaux en œuvre, à observer leurs altérations, et à établir un cahier des charges pour l'intervention d'un laboratoire privé, en appui des maîtres d'œuvre et d'ouvrage.

Les observations ont montré que la façade répond au schéma constructif classique des édifices parisiens au XVIIIe siècle : bancs francs parisiens dans les soubassements sur 3 ou 4 assises, corniches et appuis de fenêtre ; pierre de Saint-Leu (Oise) en élévation. Certains points ont été précisés et reportés sur un relevé lithologique partiel des faciès calcaires en œuvre (Fig. 39). Il a ainsi été vérifié que les ornementations sculptées (modillons, bas-reliefs de la frise, chapiteaux du 1er étage) sont d'origine, en pierre de Saint-Leu. Le parement du fronton est aussi en Saint-Leu d'origine, et son observation (appareillage, absence de traces d'outils ou de bûchage) n'a pas permis de confirmer qu'il avait été sculpté. La colonnade du 1er étage était réalisée à l'origine en banc de Saint-Leu, comme en témoigne la 3e colonne en partant de la gauche ; les autres sont en calcaires de type Vergelé de l'Oise ou du Val d'Oise (travaux au XIXe siècle). Les colonnes du rez-de-chaussée sont en pierre de Savonnières (Meuse), correspondant certainement à une substitution du XXe siècle. Ces observations ont donc permis une critique d'authenticité de cette façade, associée à la proposition de pierre de substitution pour les travaux à venir.



Figure 39 : relevé lithologique partiel de la façade sur jardin de l'Hôtel de Rohan (Paris 3e)

Il a aussi été vu que la façade a été montée avec un mortier assez grossier beige très clair, et garde les traces de quatre ou cinq interventions de rejointoiement général et/ou de réparations locales, dont probablement des mortiers à l'oxychlorure de zinc.

Concernant les altérations, au niveau de l'avant-corps et la partie droite de la façade, des désordres clairement liés à une contamination saline sont présents. L'irrégularité de certaines surfaces évoque un traitement à base de solutions acides, et un curieux faïençage de la pierre observé sous la corniche basse suggère la présence d'un traitement de durcissement de la pierre. La réalité de ces traitements, qui pourraient dater des années 30, doit être prouvée par des analyses complémentaires. Un point sensible concerne les filets de protection installés juste au-dessus de figures sculptées : l'eau de pluie suit des cheminements préférentiels à la surface du filet de protection, et, la corniche ne pouvant plus assurer son rôle de protection, ruisselle sur la sculpture.

À la suite de ses observations un cahier des charges sur les analyses à faire réaliser par un laboratoire de service privé a été établi.

Auch – 32, Gers (Midi-Pyrénées). Cathédrale Sainte-Marie. Façade occidentale. Évaluation de la faisabilité d'un traitement préalable à la consolidation des sculptures en calcaire gréseux. (Rapport n° 1365A)

Cette étude fait suite à la demande expresse de Didier Legrand, restaurateur de sculptures, de peintures murales et polychromie. Mandaté par la conservation régionale des monuments historiques de Midi-Pyrénées et sous l'autorité de l'architecte en chef Stéphane Thouin, le cahier des charges de Didier Legrand résidait pour l'essentiel en un nettoyage des parties sculptées et moulurées du massif occidental puis d'un traitement de consolidation selon l'état d'altération et de fragilité des épidermes (Fig. 40).

La pierre constitutive des sculptures est une biocalcarénite marno-gréseuse à structure micritique très hétérogène. L'altération prédominante est une desquamation prononcée qui affecte les surfaces sur plusieurs millimètres en profondeur.

Ces dégradations, uniformément développées quelles que soient l'exposition et la localisation des pierres sur l'édifice, suggèrent que cette forme d'altération pourrait préférentiellement résulter de facteurs intrinsèques au matériau, c'est-à-dire à sa composition minéralogique et/ou à ses propriétés microstructurales. La complémentarité des observations sur site et des analyses en laboratoire visant à caractériser les types d'argiles permet d'attribuer l'essentiel des altérations de cette pierre à la présence d'un cortège argileux gonflant. Or, de très nombreuses recherches ont montré l'incompatibilité des produits de consolidation à base de silicate d'éthyle avec les pierres riches en argiles, surtout lorsque les argiles présentent une capacité d'expansion et de contraction élevées dues aux variations d'humidité de l'air. Pour pallier cette difficulté, des solutions ont été développées par les fournisseurs de produits afin de bloquer les sites réactionnels gonflants des argiles et donc inhiber la fatigue thermo-hygrique des pierres, ouvrant de nouvelles possibilités pour la consolidation avec le silicate d'éthyle. L'étude a confirmé l'efficacité de ce traitement anti-gonflement préalable à la consolidation. Elle a permis en outre de valider une méthodologie de renforcement matriciel et superficiel, jusque-là jamais appliqué sur ce type de calcaire. Cette étude est par ailleurs cohérente avec les orientations stratégiques de recherche du pôle Pierre qui se sont concrétisées entre autres, par le projet de recherche *Artémie* soutenu par le ministère de la Culture et de la Communication.



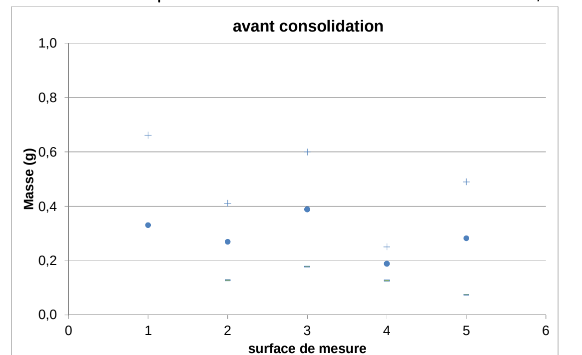
Figure 40 : état d'altération des modillons sculptés sous la corniche de la façade principale de la cathédrale.

Glux-en-Glenne – 58, Nièvre – oppidum de Bibracte, site archéologique - Évaluation de traitements de consolidation de coupes stratigraphiques archéologiques en terre crues. (Rapport n° 1372A)

Depuis 2006, des consolidations de coupes stratigraphiques du site de Bibracte, ont été tentées afin de conserver *in situ* cet ensemble archéologique unique, abrité par une couverture métallique mais sans protection latérale. Ces coupes se composent de terre crue renfermant des blocs de pierre, de la brique cuite et du charbon de bois. La difficulté de la consolidation réside dans l'hétérogénéité granulométrique des matériaux et dans le fait que la terre crue se prête mal à une consolidation matricielle. Le LRMH a donc proposé d'évaluer la consolidation au silicate d'éthyle (Estel 1000) réalisée en 2006, et d'établir d'un protocole de consolidation et de suivi d'autres coupes du site.

Les minéraux présents dans le matériau terre, en particulier les phases argileuses, pouvant faire échouer la consolidation au silicate d'éthyle, ont été identifiés : chlorite et illite pour la coupe « domus », additionnées de kaolinite, de montmorillonite et de vermiculite magnésienne pour la coupe « basilique ». Ces deux dernières argiles, dites « gonflantes », sont sensibles aux variations hydriques (imbibitions directes) et hygriques (humidité relative). Les phénomènes de gonflement et de retrait dont elles sont le siège peuvent créer des contraintes à l'interface matrice/agrégats et engendrer une désagrégation. En conséquence les nouveaux essais de consolidation ont été menés en utilisant des agents anti-gonflement (type Funcosil Antyhygro de Remmers) et des silicates d'éthyle élastifiés (type SAE 300E de Remmers).

L'évaluation des traitements n'a pu être réalisée grâce à des prélèvements « traditionnels » les carottages étant exclus du fait de l'hétérogénéité des matériaux et du manque de cohésion. Des méthodes d'évaluation



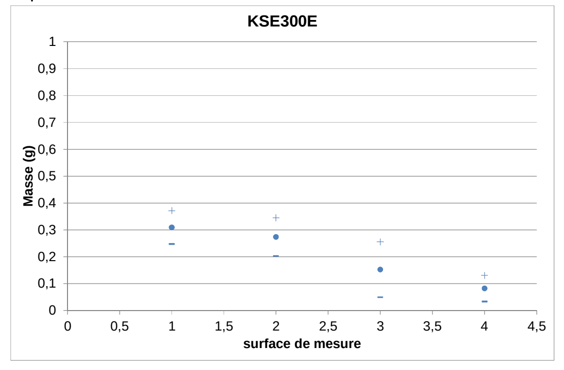


Figure 41 : essais d'arrachement au scotch sur coupe stratigraphique avant (graphique de gauche) et après (graphique de droite) consolidation à l'Estel 1000 et au KSE300E

comparatives *in situ* ont été privilégiées : suivi des modifications des propriétés capillaires selon la méthode de l'éponge, et de la cohésion de la surface par l'essai au scotch.

Les mesures de capillarité à l'éponge réalisées sur les coupes non consolidées indiquent une grande hétérogénéité au sein d'une même coupe, cet essai a permis d'ajuster au mieux la quantité de produit appliqué pour les tests (choix d'une application en une seule passe de 5l/m²). L'essai a également mis en évidence une réduction très importante des propriétés capillaires après l'application de l'Estel 1000.

Les essais d'arrachement au scotch réalisés avant consolidation montrent une grande dispersion des résultats avec des pertes de matière pouvant être très importantes (>0.5 g) et des profils irréguliers. Après consolidation, les surfaces montrent toutes des pertes de matière inférieures à 0.5 g, ainsi qu'une diminution de cette perte de matière pour des tests réalisés successivement au même endroit. Sous une certaine pulvérulence de surface, qui peut aussi être due à un empoussièrement, il y a vraisemblablement une augmentation de la cohésion du matériau due à la consolidation. Le traitement au KSE300E semble donner les résultats les plus homogènes (FIG. 41).

Cette étude a montré l'effet des consolidants testés, tant par une diminution des propriétés de transfert hydrique que par une augmentation de la cohésion de surface des coupes stratigraphiques archéologies en terre crue. Elle a permis de sélectionner, à l'aide d'essais de terrain simples, le produit le plus adapté : le KSE300E. Son application aux minéraux argileux est appropriée, il influe peu sur les propriétés capillaires et a une bonne compatibilité avec le matériau initial.

Formation

Techniques simples de diagnostic sur pierres et mortiers

Dans le domaine de la conservation de la pierre, de nombreuses méthodes utilisant les hautes technologies, souvent mises au point à l'origine pour des applications industrielles, ont été adaptées aux conditions de terrain. Ces techniques représentent un apport précieux car généralement elles sont non destructives ou non invasives. Cependant, le plus souvent, elles ne peuvent pas être mises en œuvre par les restaurateurs car elles sont trop chères et non utilisables en autonomie. D'un autre côté, les méthodes simples de terrain tendent à être discréditées, car jugées peu précises et/ou obsolètes. C'est dans ce contexte que plusieurs laboratoires européens se sont attachés ces dernières années à proposer des tests de terrain faciles et peu onéreux à mettre en œuvre, comme le scotch test et le test à l'éponge. Par ailleurs, les restaurateurs de sculptures français font chaque jour preuve d'une grande ingéniosité pour adapter les tests de laboratoire aux contraintes d'atelier et de maîtrise des coûts. Le pôle Pierre a voulu faire connaître ces tests aux praticiens, en organisant les 25-26 septembre 2014 un stage de formation, sous la houlette et dans le cadre logistique du service de formation permanente de l'Institut national du patrimoine.

L'équipe enseignante comportait 2 restaurateurs de sculptures et 3 scientifiques en conservation. La formation a accueilli au LRMH, 11 stagiaires (un architecte du patrimoine, un archéologue, 4 scientifiques en conservation, 6 restaurateurs).

Plusieurs tests ont été abordés, entre autres l'absorption d'eau à l'éponge, la mesure de cohésion superficielle par bande adhésive, et l'identification de sels par microchimie.





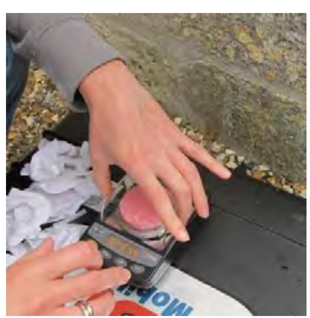


Figure 42 : test d'absorption d'eau à l'éponge mis en œuvre sur un parement à l'abbaye de Chaalis (60, Oise).

Véronique Vergès-Belmin, responsable du pôle Pierre, ingénieur de recherche
Ann Bourgès, ingénieur de recherche
Mikaël Guiavarc'h, technicien de recherche
Lise Leroux, ingénieur de recherche
Jean-Didier Mertz, ingénieur de recherche

PÔLE SCIENTIFIQUE Textile

Introduction

Le pôle Textile est un pôle mixte qui a été créé en 1984 au LRMH pour répondre aux besoins exprimés par la conservation des collections textiles des monuments historiques et des musées. Au cours de ces 20 années d'existence, le pôle a trouvé sa place comme interlocuteur privilégié de la communauté textile, pour répondre aux demandes spécifiques de l'analyse et de la conservation/ restauration des matériaux textiles.

La situation du pôle textile est inquiétante.

- Aujourd'hui : depuis l'arrêt au LRMH de l'activité du pôle analytique en 2013, il n'est plus en mesure d'assurer l'analyse des colorants. On ne peut que regretter les conséquences sur la perte de compétences et de savoir-faire, unique en France dans le domaine patrimonial.
- Demain : par la question de son avenir, qui se pose avec le départ à la retraite de son responsable et unique agent prévu pour 2016.

En plus du domaine d'application propre aux matériaux textiles, une partie de l'activité du pôle est attachée aux problèmes d'infestation des collections.

En 2013/2014, le pôle textile a répondu à 14 demandes d'études de cas commandées par les maîtres d'œuvre et les restaurateurs.

- Il est intervenu dans diverses missions d'assistance à décision pour des projets d'établissements :
  - le musée de Cluny pour les tentures de la Dame à la licorne (2011-2012) ;
  - la DRAC Auvergne pour les tapisseries de la Chaise-Dieu (en cours) ;
  - la DRAC Normandie pour la Broderie de Bayeux, en collaboration avec le C2RMF (en cours) ;
  - la DRAC Provence-Alpes-Côte-d'Azur pour le Trésor de la cathédrale d'Embrun (2014) ;
  - la DRAC Centre pour les tapisseries de l'Apocalypse d'Angers (en cours).
- Il contribue depuis 2011 aux travaux du comité technique de normalisation AFNOR (CEN/TC 346) rassemblé autour de la thématique « Conservation des biens culturels » et coordonne le groupe de travail sur la gestion de lutte intégrée des nuisibles.
- Il intervient dans les activités pédagogiques et de formation au sein de l'Institut national du patrimoine, de l'école du Louvre, du Master Conservation-Restauration des biens culturels (Université Paris 1-Sorbonne) ainsi qu'à la demande du service de formation de la direction générale des Patrimoines.

Études

Les demandes d'étude ne sont pas toutes de même ampleur et ne réclament pas le même investissement en temps et en analyse. Nous présenterons plusieurs études qui ont marqué l'activité du pôle Textile au cours de ces dernières années.

Musée du Louvre – Manteaux de l'ordre du Saint-Esprit Étude des fils métalliques du manteau de chevalier. (Rapport n° 1167C).

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la thématique menée par le pôle Textile sur les techniques de fabrication des fils métalliques. Au fur et à mesure des campagnes de restauration que mène le département des objets d'art du musée du Louvre sur les manteaux de l'ordre du Saint-Esprit datés au XVIIe siècle, les fils métalliques des broderies sont analysés. À l'occasion de la restauration du manteau de chevalier MS 51, une étude a été faite sur les fils métalliques des broderies

La ternissure qui se développe sur les fils métalliques masque le plus souvent la dorure originale et seules les observations et analyses de la structure au MEB/EDS permettent d'apporter des informations sur la composition et la structure des lames métalliques. Les faces externes et internes ainsi que la tranche des lames (après préparation de sections polies) sont analysées. 13 prélèvements ont été caractérisés.



Figure 44 : filé constitué d'une lame métallique enroulée en torsion S sur une âme de soie blanche. Il présente un aspect terne et noirci.

Figure 45 : la section polie montre une matrice en argent recouverte par une fine couche d'or.

Les broderies sont réalisées avec différentes catégories de fils métalliques or et argent : lames or, lames or plissées, filés et traits or. Les mêmes caractéristiques de fabrication sont principalement constituées d'une matrice en argent avec des inclusions de cuivre. Les lames or sont dorées des deux côtés. La composition du métal permet de distinguer clairement les lames de restauration qui sont constituées d'une matrice en cuivre.

Lyon. Musée des tissus et des arts décoratifs. Identification de cinq tissus coptes provenant des fouilles d'Antinoë. (Rapport n° 1144F).

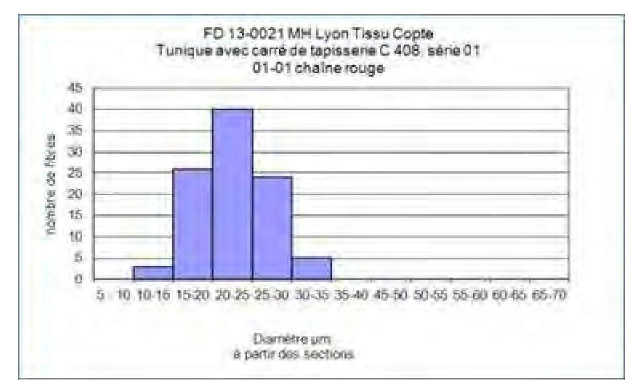
L'exposition « Antinoë, à la vie, à la mode. Visions d'élégance dans les solitudes » du musée des Tissus de Lyon en octobre 2013 a été l'occasion de redécouvrir et de présenter l'ensemble des résultats des fouilles menées sur le site d'Antinoë (Égypte) à la fin du XIX[e] siècle par Albert Gayet. Ce fut aussi l'occasion d'étudier et d'analyser les nombreuses pièces inédites conservées dans la collection du musée et restaurées pour l'occasion. Une série d'analyses portait sur l'analyse et l'identification des espèces animales utilisées pour confectionner ces tissus de laine.



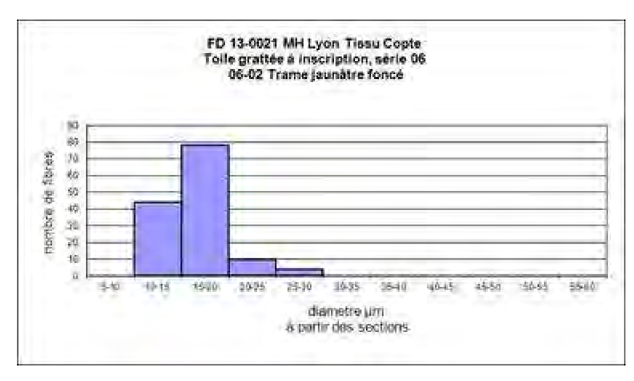
Figure 46 : toile grattée à inscription. MT B106 - Série 06.

Les histogrammes de distribution des diamètres des fibres ont permis d'en décrire plusieurs types :

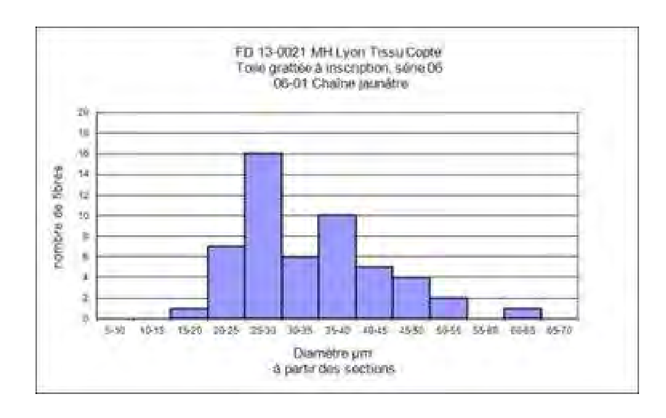
- distribution uniforme, avec une bonne répétabilité des mesures lorsqu'il est resserré et symétrique ;



- distribution inégale avec une asymétrie positive lorsque la courbe s'étale vers la droite ;



distribution hétérogène et composée de plusieurs catégories de fibres lorsqu'il est étalé et plurimodal.



< 20 µm,	20 à 30 µm	30 à 40 µm	50 à 60 µm	> 60 µm
fin	demi-fin	moyen	épais	grossier

La quantité réduite d'échantillons et l'absence d'analyse statistique ne permettent pas de considérer la taille des poils comme un critère d'identification des espèces animales suffisamment fiable pour distinguer le mouton, la chèvre ou le dromadaire, d'autant que la toison d'une même espèce ne présente pas une qualité unique de poils. Les facteurs non génétiques comme l'âge, la qualité de l'élevage, la saison de la tonte, etc. sont de multiples paramètres qui peuvent modifier la qualité du pelage et le diamètre des fibres. De plus les caractéristiques du pelage ont probablement évolué au gré de la sélection des espèces, et ne correspondent pas aux références établies par rapport aux espèces actuelles.

L'analyse des fibres nous apporte des informations sur le travail de la laine : notamment sur la sélection des fibres et le soin apporté au tri. Elle nous renseigne aussi sur la qualité des fibres choisies par rapport à l'usage du textile. L'analyse du caftan et du pantalon met en évidence la qualité de laine très fine et homogène qui a été utilisée pour le poil gratté, alors que la chaîne est faite avec un fil de qualité différente, avec des fibres moins fines et plus hétérogènes. Le pantalon est aussi confectionné avec une qualité de fibre recherchée, fine et homogène. Ce travail a montré les limites rencontrées dans l'identification des fibres animales et il serait nécessaire de mener des recherches dans ce domaine.

Bayeux (14, Calvados). Broderie de la Reine Mathilde (XIe siècle). Contrôle de l'état de conservation. Centre Guillaume le Conquérant. (Rapport n° 323D).

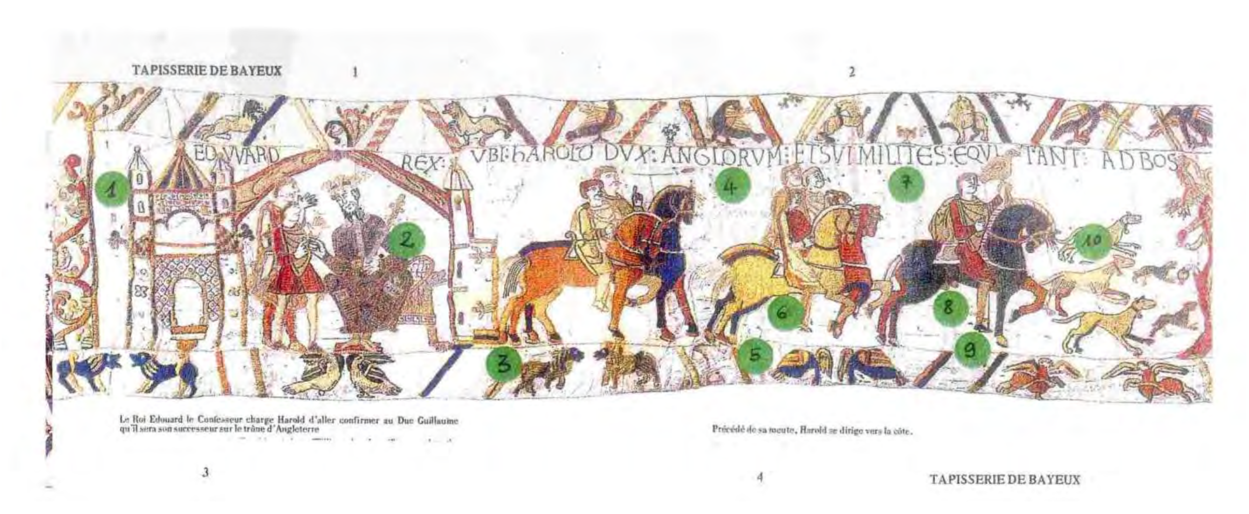


Figure 47 : représentation du début de la broderie de la reine Mathilde. Les numéros correspondent aux zones de suivi photographique.

L'état de conservation de la broderie de la reine Mathilde a été suivi par des campagnes photographiques successives depuis 1985, année de sa présentation au centre culturel Guillaume le Conquérant. La dernière campagne réalisée en janvier 2014 a été comparée à celle de 1985, nous apportant ainsi un regard sur 29 années de conditions d'exposition.

Le constat d'état de 1985, mentionne la fragilité et le mauvais état de conservation de la broderie. Différents types d'altération s'observent tout au long des 60 mètres, sur le tissu de support :

- fragilité : affaiblissement de la toile avec rupture de fils de chaîne et de trame en certains endroits ;
- déchirures : lacunes importantes, manques de matière ;
- trous : orifices de petite taille avec rupture des fils de chaîne et de trame (trous d'aiguilles ou de clous) ;

- reprises : restaurations exécutées à l'aiguille mais sans tissu de support ;
- ravaudage : reprise grossière faite en piquetant la toile aux alentours de la fente ;
- taches : colorées orangées ou grises, petites et groupées pouvant provoquer des trous ;
- pièce de restauration : ajout de pièces de toile destinées à renforcer ou combler un manque ;
- superposition : plusieurs pièces de toile se couvrent et forment des surépaisseurs ;
- tension de la broderie : déformations et plis crées par la broderie.

Au regard des clichés de 1985, la dernière campagne photographiques permet de voir qu'il n'y a pas eu au cours de ces 29 dernières années d'aggravation de l'état des zones fragilisées. Il n'y a pas de rupture supplémentaire de fils de chaîne ou de trame des zones fragilisées, les tensions créées par les reprises ne se sont pas aggravées. Les déformations et les fils flottants sont toujours à leur même place et dans la même position. Il n'y a pas d'augmentation du nombre de taches.

L'environnement privilégié dont bénéficie la broderie depuis son installation dans la vitrine du local technique a contribué à la maintenir dans un état stationnaire. La stabilité du climat a empêché les variations dimensionnelles ; les effets redoutés des tensions créées par l'accrochage vertical ne sont pas manifestes. On peut souligner cependant que la broderie n'a jamais été décrochée et manipulée au cours de ces années, ce qui a certainement permis d'éviter l'aggravation de son état de conservation.



1985



2014

Figure 48 : observation des déformations et déchirures du point n° 3.



1985



2014

Figure 49 : observation de l'altération au point n° 5. Les pièces de restauration superposées et le fil flottant n'ont pas bougé.

Dominique De Reyer, responsable du pôle Textile, ingénieur de recherche

PÔLE SCIENTIFIQUE Vitrail

Introduction

Dans le cadre de sa mission d'assistance scientifique et technique aux travaux de conservation-restauration des vitraux, le pôle scientifique Vitrail accompagne la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre dans l'élaboration du diagnostic et des préconisations de traitements.

Lors des études préalables conduites par les architectes en chef des monuments historiques (ACMH), le pôle Vitrail peut également être amené à participer à la relecture des cahiers des clauses techniques et particulières (CCTP) afin de préciser les détails des différentes interventions lors de la restauration des vitraux. Dans la majorité des cas complexes, l'ACMH pourra s'associer à un restaurateur qualifié (Master CRBC, Université Paris 1 Sorbonne) qui, en collaboration avec le LRMH, identifiera les difficultés et mettra en place les méthodes de nettoyage et de traitement.

L'observation de panneaux déposés, représentatifs de l'ensemble des vitraux concernés par la restauration, pourra permettre d'évaluer les différentes problématiques d'altération des verres, des grisailles, du réseau de plomb et des armatures métalliques. Cette étape est essentielle et permet de devancer les problèmes et d'assurer les délais de restauration. Pendant la restauration, le pôle scientifique Vitrail apporte également son expertise lors des réunions de chantier en accompagnant les restaurateurs dans les étapes délicates de nettoyage, collage et consolidation.

De décembre 2012 à novembre 2014, le pôle scientifique Vitrail a été sollicité sur plusieurs opérations, conduisant à la rédaction de 11 rapports d'études, 26 notes et courriers.

La restauration des vitraux du déambulatoire de Saint-Denis a commencé en septembre 2014 pour une durée d'un an. Afin d'assurer un espace de travail optimal pour les restaurateurs et les scientifiques, un réaménagement des locaux dédiés à l'étude des vitraux a été réalisé.

Le Comité scientifique pour la conservation des vitraux (CSICV, http://sgc.lrmh.fr//) et l'ICOMOS organisent le prochain Forum international pour la conservation et la technologie du vitrail à Paris du 8 au 10 juillet 2015 dont le sujet sera « Le vitrail, comment prendre soin d'un patrimoine fragile ? ». Les agents du pôle vitrail, également membre du Corpus Vitrearum, sont fortement impliqués dans cette conférence internationale.

Parallèlement à ses missions d'expertise, le pôle scientifique Vitrail mène une activité de recherche appliquée à la conservation-restauration des vitraux. Les projets menés ces deux dernières années sont présentés dans la partie « Programmes de recherche » (PNRCC CAVIAR cf. p. 67 ; Étude du phénomène de brunissement des vitraux médiévaux cf. p. 69 ; Le Cyclop cf. p. 113 ; Caractérisation de la composition chimique des verres et des grisailles des vitraux par faisceau d'ions (analyses PIXE-PIGE sur AGLAE) cf. p. 66.

Trois nouveaux projets de recherche ont également été déposés au cours de l'année 2014.

Le projet Convergence « VITRAUX » a été accepté et a commencé au 1er septembre 2014 pour une durée d'un an (projet financé par l'IDEX Sorbonne-Université, coordonné par Michel Hérold, Centre André Chastel, Paris 4). Ce projet pluridisciplinaire concerne une verrière d'exception, la rose ouest de la Sainte-Chapelle de Paris, et devrait permettre de croiser les hypothèses et les interrogations posées par les historiens de l'art et de les confronter aux résultats de l'étude matérielle des verres.

Le projet « Glass and Limestone Alteration: an innovative Methodology to study its mechanisms and kinetics (GLAM) » a été déposé auprès de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Il a été accepté et a commencé en octobre 2014 (Projet financé par l'ANR, coordonnée par Mandana Saheb LISA, UPEC, Créteil). Ce projet est dans la continuité du projet PNRCC CAVIAR, qui s'est achevé après deux années de recherche en septembre 2014.

Le projet « Alteration of POtassic Glasses of historical interest : Effect of composition and Environmental parameters (APOGEE) », impliquant cinq partenaires, a été proposé à l'appel de « Heritage Plus Joint Call », mais sans succès.

Étude de vitraux de François Décorchemont

La technique du vitrail en dalle de verre ou en pâte de verre met en œuvre trois matériaux différents : le métal, le mortier et le verre. La conservation de ces œuvres est extrêmement complexe. En effet, les processus d'altération initiés par les conditions environnementales (principalement l'apport en eau), la nature des matériaux et les contraintes structurelles entrainent des pathologies graves. Les demandes d'intervention du LRMH sur ce type d'ouvrage sont croissantes. Les premières recherches en conservation-restauration ont été initiées en 2004 par les deux pôles Béton et Vitrail du LRMH. Actuellement, le LRMH mène une réflexion avec des équipes européennes allemande et belge afin de renforcer la recherche dans ce domaine.

Implication au niveau international : Claudine Loisel examinateur du jury de thèse de Kristel de Vis : The Consolidation of Architectural Glass and Dalle de Verre; Assessment of Selected Adhesives, Université d'Anvers, soutenue le 20 mai 2014.

CONCHES-EN-OUCHE (27, Haute-Normandie) Musée de Conches en Ouche, Vitrail de la Pietà de François Décorchemont

Ce vitrail, daté de 1934, est l'un des premiers vitraux de François Décorchemont (Fig. 50). Il avait été présenté, la même année, à l'exposition universelle sur la Passion du Christ au Trocadéro. Le panneau a été exposé sous un auvent devant l'atelier de l'artiste jusqu'en 2011, date de son acquisition par le musée de Conches-en-Ouche.

Dans le cadre de sa restauration, le LRMH a été contacté pour apporter son aide au niveau du conseil scientifique et technique. La restauration, réalisée par Stéphane Petit au cours de l'année 2013, a été prise en charge par le musée de Conches-en-Ouche.

Un dépoussiérage à la brosse douce a été réalisé sur les armatures, les mortiers et les verres. Un nettoyage délicat au bâtonnet avec un mélange eau-éthanol à 50 % a ensuite été effectué sur les deux faces des verres. Des coulures de peinture ont été éliminées à l'aide d'un solvant adapté. Les casses majeures ont été consolidées à l'aide d'une résine époxy. L'application d'une peinture anti-corrosion a été réalisée partiellement sur le cadre d'entourage.

Intervention orale : Claudine Loisel, Fanny Bauchau, Stéphane Petit, Élisabeth Marie-Victoire, Annick Texier : La restauration du vitrail de la pietà de François Décorchemont. Journée d'étude Vitraux en pâte de verre, Vitraux en dalle de verre, Musée du Verre de Conches, 15 novembre 2014.



Figure 50 : vue en lumière réfléchie d'un détail de la face interne du vitrail de la Pietà de François Décorchemont.

DURANVILLE (27, Haute-Normandie) Église de Duranville Vitrail de François Décorchemont

À la demande de la direction régionale des affaires culturelles de Haute-Normandie, le LRMH a été contacté pour réaliser un état sanitaire du vitrail de l'église de Duranville, représentant Sainte-Thérèse de Lisieux et réalisé en 1950

Le diagnostic porte sur l'observation des armatures, des mortiers et des verres sur les deux faces, interne et externe.

Le nombre important de fissures sur les verres et les mortiers ainsi que la corrosion des armatures montrent une urgence dans la dépose de ces baies. La fragilité de l'ensemble est due à un problème mécanique initié par la corrosion des armatures en face externe, mais également à la dilatation thermique différentielle relativement forte entre les mortiers et l'armature en fer.

Une réflexion sur le mode de dépose, mais aussi sur la repose (dans le but de limiter les contraintes thermiques) doit être conduite afin d'intervenir dans les meilleures conditions sur cette œuvre majeure de François Décorchemont.

Étude de vitraux de la Sainte-Chapelle de Paris

Depuis 2011, une importante campagne de restauration des vitraux de la Sainte-Chapelle de Paris a été lancée par le Centre des monuments nationaux et la direction régionale des affaires culturelles d'Île-de-France, sous la maîtrise d'œuvre de Christophe Bottineau, ACMH. La campagne a débuté par la restauration des vitraux de la façade nord de la nef, datant du XIIIe siècle (baies 107, 109, 111 et 113), puis s'est poursuivie par la restauration de la rose occidentale du XVe siècle. Les travaux devraient s'achever en février 2015.

Lors de ces différentes interventions, le LRMH a été contacté afin d'apporter une aide au diagnostic de l'état sanitaire des baies et à la mise en place du protocole de nettoyage.

PARIS (1er) - (Île-de-France), Sainte-Chapelle. Travées L et M : baies 107 et 109, Vitraux (XIIIe siècle), État sanitaire et analyses scientifiques (Rapport n° 53E).

Afin de caractériser l'état des vitraux avant restauration et d'orienter le choix des traitements de nettoyage, une analyse des différents dépôts et des produits de dégradation rencontrés a été réalisée sur des panneaux représentatifs de l'ensemble des baies (un panneau est présenté en figure 51).



Figure 51 : vue en lumière transmise de la face interne du panneau a28 de la baie 109 de la Sainte-Chapelle de Paris.

Les baies 107 et 109 de la Sainte-Chapelle présentent des caractéristiques similaires aux baies de la façade sud et du chœur restaurées précédemment. Trois types de dépôts ont été caractérisés : un dépôt en face externe identifié comme étant une croûte noire gypseuse attribuée à la pollution atmosphérique particulaire (Fig. 52) et deux dépôts en face interne correspondant à un premier badigeon de plâtre, recouvert par une patine artificielle préparée à base d'une grisaille et d'un liant organique (Fig. 53). L'application de ces deux couches pourrait s'expliquer par une volonté d'obscurcissement des panneaux ou encore d'unification des lacunes de grisaille.

Par ailleurs, les verres et grisailles ont été caractérisés. Les verres d'origine sont pour la plupart dans un très bon état de conservation, malgré leur composition de type calco-potassique. Seuls certains verres de couleur pourpre présentent une corrosion généralisée sur l'ensemble de la surface du verre, avec formation de produits d'altération poudreux identifiés comme étant majoritairement de la syngénite. Certains verres rouges de restauration présentent également une altération particulière. Ces verres plaqués semblent avoir été traités à l'acide afin d'imiter l'aspect des verres rouges fouettés d'origine. Certains de ces verres apparaissent aujourd'hui lacunaires au niveau du plaquage rouge, probable conséquence à long terme du traitement à l'acide.

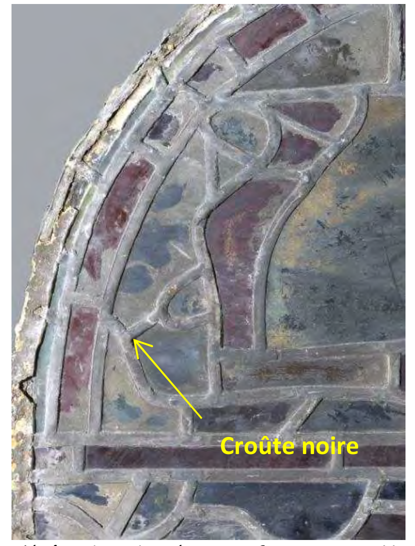


Figure 52 : dépôt gris-noir présent en face externe. Vue en lumière réfléchie. Détail du panneau c11 de la baie 109.

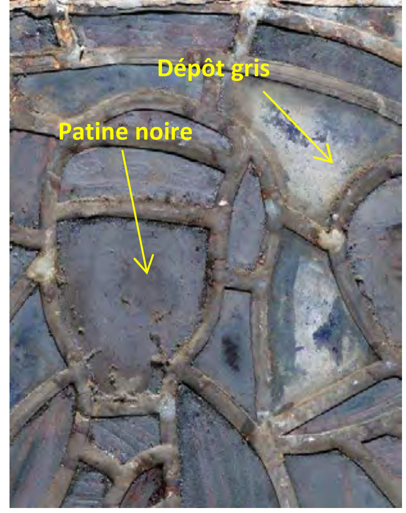


Figure 53 : dépôt gris et patine noire présents en face interne. Vue en lumière réfléchie. Détail du panneau c11 de la baie 109.

PARIS (1er) - (Île-de-France), Sainte-Chapelle.
Rose occidentale, Vitraux (XVe siècle), Face interne : caractérisation d'une couche grise (rapport n° 53G).

Lors de la restauration de la rose occidentale, des questionnements similaires ont été soulevés, notamment quant à l'identification d'une couche grise présente en face interne des panneaux (Fig. 54).

Des interrogations se posent sur la nature et l'origine de cette couche et par conséquent sur l'intervention à réaliser (élimination ou conservation). Les relevés graphiques des verrières de Louis Steinheil, réalisés au XIXe siècle avant restauration, permettent une comparaison de l'état d'alors avec l'état actuel de conservation (Fig. 54 et 55). On remarque l'apparition d'importantes lacunes de peinture. La couche grise pourrait ainsi correspondre à la peinture d'origine ou à un badigeon apposé lors d'une restauration afin de combler ces lacunes.

Les observations et analyses ont été réalisées sur une pièce dépiquée (tête du personnage de la figure 55). Elles mettent en évidence la présence de deux couches en face interne : une couche de couleur noire et une couche grise sous-jacente. La couche noire, qui subsiste de manière très sporadique sur certains traits de grisaille, semble composée d'oxydes de fer. Des grains de noir d'os ont également été détectés ponctuellement. La couche grise semble essentiellement composée de sulfate de calcium. L'absence de plomb et d'oxydes métalliques, éléments constitutifs de la grisaille analysée par ailleurs, conduit à penser que cette couche ne correspond pas à une peinture originelle, mais plutôt à un badigeon de type plâtre. La non détection de liant organique au sein de cette couche ne permet pas de conclure quant à sa présence initiale ou non, au vu de l'état de dégradation de la couche (friabilité importante).

Cette stratigraphie rappelle celle observée sur les autres baies de l'édifice lors des restaurations précédentes. L'application de ces deux couches pourrait s'expliquer là encore par une volonté d'obscurcissement des panneaux ou d'unification des lacunes de grisaille.



Figure 54 : détail du panneau E4 de la rose occidentale de la Sainte-Chapelle de Paris. Vue en lumière transmise de la face interne.



Figure 55 : détail du panneau E4 de la rose occidentale de la Sainte-Chapelle de Paris, face interne. Relevé graphique de Louis Steinheil.

Claudine Loisel, responsable du pôle scientifique Vitrail, ingénieur de recherche
Fanny Bauchau, ingénieur d'étude

PÔLE DOCUMENTAIRE

Introduction

Pour répondre aux demandes tant des ingénieurs, techniciens et stagiaires du Laboratoire qu'au public extérieur (chercheurs, étudiants, historiens d'art, architectes, restaurateurs...), le pôle documentaire est chargé de constituer, conserver et diffuser l'information scientifique et technique publiée ou reçue par le Laboratoire.

Pour assurer ces missions, le service s'est fixé pour principal objectif de faciliter l'accès aux informations tout en pérennisant les données. Pour ce faire, au cours des deux dernières années, l'accent a été mis essentiellement sur le circuit des demandes d'intervention, l'archivage numérique et la valorisation de l'information.

Outil de demande d'intervention

Cet outil doit permettre de répondre aux missions d'information et de contrôle scientifique et technique du LRMH tant sur les monuments ou objets - classés ou inscrits - que sur les objets de musée ou les archives. Pour répondre aux objectifs fixés, il est prévu de créer un guichet internet pour saisir en ligne les demandes d'intervention du laboratoire. Ce guichet permettra non seulement de fluidifier le circuit des demandes, mais aussi que toutes soient prises en compte en termes d'activité de service.

Les réflexions portées par le groupe de travail au sein du LRMH ont d'ores-et-déjà permis :

- d'établir le circuit de la demande d'intervention ;
- de proposer un modèle de guichet internet ;
- de définir la liste des champs de la base ;
- de proposer un certain nombre de requêtes et de formulaires utilisant des champs pré-remplis.

Le document de travail proposé en octobre 2014 au comité de laboratoire sera complété au cours de prochaines réunions afin qu'un cahier des charges soit établi par Bérangère Raspaut, secrétaire générale, au cours du premier semestre 2015 pour un appel d'offre au tout début du troisième trimestre 2015.

Archivage numérique

Au sein du Laboratoire, de nombreuses réflexions ont été menées depuis 2012 sur l'harmonisation des pratiques d'archivage. Outre les publications ou photographies déjà prises en compte grâce aux différents outils documentaires en place depuis longtemps, de nombreux documents sont archivés selon un cadre de classement mis à jour régulièrement. Cet outil - conçu pour les documents imprimés - connaît aujourd'hui une évolution pour répondre également aux nécessaires contraintes liées à l'archivage des documents électroniques produits ou reçus. En 2013 une enquête a été réalisée afin de connaître les pratiques des agents concernant le classement des documents, des données numériques et des échantillons.

Le but était d'harmoniser et cadrer les pratiques actuelles, d'améliorer l'archivage et le classement et de réaliser un vrai archivage pérenne. Cette année, des tableaux de gestion des documents ont été élaborés pour certains pôles. La finalisation de ces tableaux doit se poursuivre pour chaque service en 2015.

Un guide de bonnes pratiques pour la gestion des documents est en cours d'élaboration. Il a pour objectif de présenter le cadre de classement pour les documents imprimés et électroniques et d'aider au nommage des fichiers électroniques. Il guidera les agents dans la gestion courante de leurs documents dès la création et jusque qu'à leur classement au sein d'une arborescence électronique dont la mise en place est prévue pour janvier 2015.

Bases de données

En 2013, le Centre de recherche sur la conservation des collections (CRCC) avait souhaité que les notices bibliographiques des monographies indexées dans sa base - non accessible sur le web - soient versées dans la base de données Castor du LRMH. Grâce à un programme de concordance des champs des deux bases de données - réalisé par François Laissus, consultant informatique au LRMH -, à un travail d'harmonisation de nos vocabulaires respectifs et à une relecture minutieuse des fiches, près de 1 600 notices du CRCC sont maintenant accessibles sur internet *via* le portail du Centre de recherche sur la conservation (CRC) ou celui du LRMH.

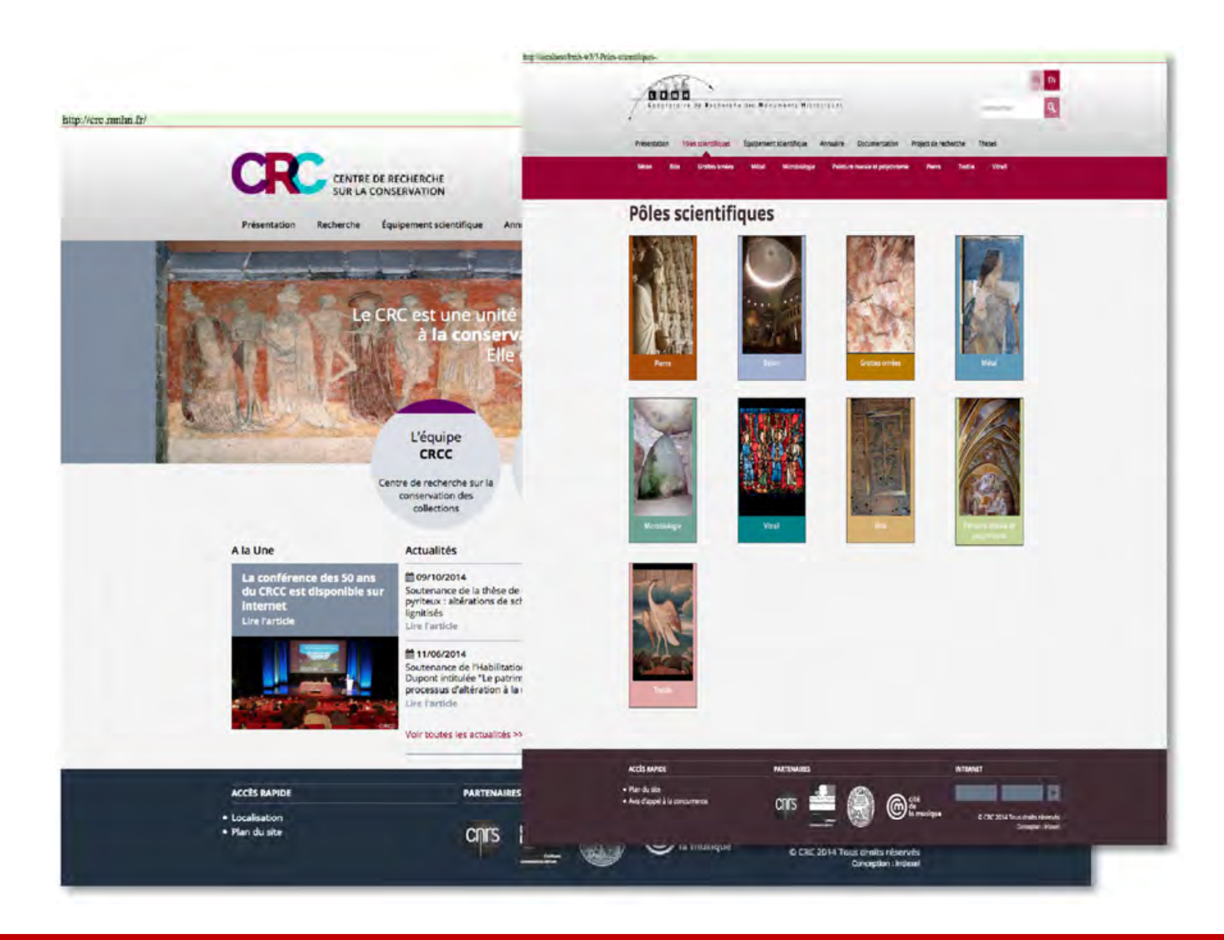
D'autre part, une nouvelle campagne de numérisation des rapports et des publications des agents du Laboratoire a été réalisée en juin-juillet 2014. Il nous semblait en effet important de valoriser les résultats des recherches réalisées par les agents du LRMH, non seulement par les voies traditionnelles, mais aussi par l'accès aux articles scientifiques *via* notre base de données *Castor*. D'ores et déjà, plus de 1 850 publications ou rapports sont accessibles en intranet et/ou en internet.

Site internet

En 2013 et 2014, le projet de refonte des deux sites internet, respectivement pour le CRCC et pour le LRMH, a été réalisé en poursuivant plusieurs objectifs :

- créer une plateforme commune pour rendre compte des activités au sein de l'USR-3224 du CNRS, ce qui s'est traduit par le lancement du site crc.mnhn.fr, commun aux trois équipes : LRMH, CRCC et ECR pour le musée de la Musique ;
- et en parallèle, mettre en ligne pour la fin de l'année 2014 un nouveau site pour le LRMH.

Cette refonte s'est d'abord concentrée sur la plateforme commune de façon à publier le site du CRC dès le début de l'année 2014, avant de réviser entièrement le site actuel du LRMH, tant au niveau de son contenu que de sa forme. La mutualisation de la démarche sur les deux projets a permis de dégager une unité de forme concernant la présentation des pages et l'installation d'un système de gestion de contenu pour gérer le site de manière collaborative et *via* des interfaces d'administration privée.



Élise Leboucher, responsable du pôle documentaire, ingénieur d'études
Véronique Dignac, secrétaire de documentation
Olivier Malavergne, documentaliste indépendant
François Laissus, consultant informatique

3.2 Programmes de recherche

Recherche sur la connaissance des matériaux du patrimoine et de leur dégradation

Recherches sur la conservation et la restauration du patrimoine

Optimisation de techniques d'analyses ou de diagnostic des matériaux du patrimoine

Gestion et traitement des données

3.2.1 Recherche sur la connaissance des matériaux du patrimoine et de leur dégradation

ACOPAL : Altération des COllections de PALéobotanique : imagerie multi-échelle de matières organiques soufrées réactives à l'oxygène et l'humidité

Durée : 2014-2015

Les collections de paléobotanique font partie de notre patrimoine tout en constituant un matériel d'étude qui doit être mis à disposition d'une communauté de chercheurs. Leur bonne conservation concerne aussi bien la sauvegarde de leur apparence, que l'authenticité du matériau lui-même, susceptible de livrer dans le futur de nouvelles informations. Cette double exigence constitue un véritable défi dès lors que l'on considère des matériaux fossiles riches en sulfures. Au contact de l'air et de l'humidité, ces matériaux sont sujets à des réactions d'oxydation, de nature chimique et/ou biologique, conduisant à des efflorescences indésirables de sulfates et à une fragilisation mécanique de l'empreinte fossile. Il a été constaté que ces efflorescences étaient largement liées aux sulfures organiques, qui semblent encore plus réactifs que les sulfures métalliques.

Ce projet porte donc sur l'étude de matériaux fossiles contenant des sulfures organiques et sur les changements de structure et de composition qui ont lieu au cours de leur séchage ou de leur préparation. Le matériel étudié correspondra à des bois lignitisés des sites d'Angeac (Charente) et de Rivecourt (Oise) et à des schistes argileux du site de Muse (Saône-et-Loire). La démarche analytique mettra en œuvre des techniques microbiologiques, biochimiques, physicochimiques (XANES) ainsi que des techniques d'imageries (MEB/EDS, radiographie, tomographie) permettant de cartographier les matériaux à l'échelle micro-nanoscopique.

Le projet, financé par la COMUE Sorbonne-Université, Idex SUPER (programme Convergence) est menée par Véronique Rouchon de l'équipe CRCC avec la collaboration du pôle Microbiologie de l'équipe LRMH.

Pour mieux appréhender le rôle potentiel de l'activité biologique dans les phénomènes d'oxydation des sulfures, le rôle du pôle Microbiologie dans ce projet est de dénombrer et de détecter la présence des bactéries sulfo-oxydantes (BSO) et sulfato-réductrices (BSR) sur les bois lignitisés et des schistes argileux prélevés dans différents sites.

Collaboration : Physicochimie des électrolytes et nanosystèmes interfaciaux, UMR 8234 (Laurent Michot, Pierre Levitz), Centre de recherches sur la paléobiodiversité et les paléoenvironnements, UMR 7207 (Dario De Franceschi, Ronan Allain, Jean-Sébastien Steyer).

Personnel permanent : Véronique Rouchon, porteur du projet (équipe CRCC), Faisl Bousta, Alexandre François, Johann Leplat (équipe LRMH).

Post-Doctorant : Giliane Odin.

Financement : Convergence Patrimoine 2014.

Montant : 80 000 €.

Analyse génomique de la diversité microbienne d'une grotte ornée

Durée : 2014- 2015

Le projet s'intéresse à l'évaluation de la diversité microbienne (bactérienne et fongique) cultivable et non-cultivable, de grottes ornées ouvertes au public ou non visitées. Cet écosystème particulier est encore peu connu, les études préalables ayant été très fragmentaires et surtout orientées sur la diversité bactérienne du sol et des parois.

Ce projet a donc pour objectif d'améliorer la connaissance de l'écosystème de grottes ornées ouvertes ou non au public, par la description :

- de la diversité microbienne globale (bactéries, levures et champignons), cultivable et non-cultivable, dans le sol, l'air et sur les parois des grottes ;
- des caractéristiques physiques et écologiques des grottes.

Les méthodes microbiologiques classiques d'isolement des micro-organismes seront complétées par des analyses métagénomiques, et par la description des caractéristiques physiques et climatiques des grottes échantillonnées.

La compréhension de l'écosystème permettra de répondre à des questions difficiles et souvent polémiques de conservation du patrimoine, ou à des questions de santé animale afin de comprendre l'épidémie destructrice de *Geomyces destructans* sur les chauves-souris en Amérique du Nord, alors que les animaux européens résistent au pathogène. Elle pourra aussi répondre à des questions plus fondamentales concernant la biologie des milieux extrêmes.

Collaboration : Muséum national d'histoire naturelle - Département systématique & évolution (Joëlle Dupont), Service de systématique moléculaire (Régis Debruyne).

Personnel permanent : Faisl Bousta, Alexandre François, Johann Leplat, Stéphanie Touron.

Financement : Action Transversale Muséum.

Montant : 3 900 €.

Caractérisation de la composition chimique des verres et des grisailles des vitraux par faisceau d'ions (analyses PIXE-PIGE sur AGLAE)

Durée : 2006-2014

À l'occasion des travaux de restauration de grands ensembles médiévaux, des panneaux de vitraux sont déposés pour examen de leur état de conservation par le LRMH. Les produits d'altération et dépôts sont caractérisés au laboratoire, mais il est rarement possible de procéder à une analyse quantitative de la composition des verres, car celle-ci nécessite la réalisation de prélèvements.

Les méthodes d'analyse non invasives PIXE-PIGE qu'offre l'accélérateur AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire) situé au C2RMF permettent une analyse quantitative directement sur les panneaux, sans prélèvement, ni dessertissage (Fig. 56).

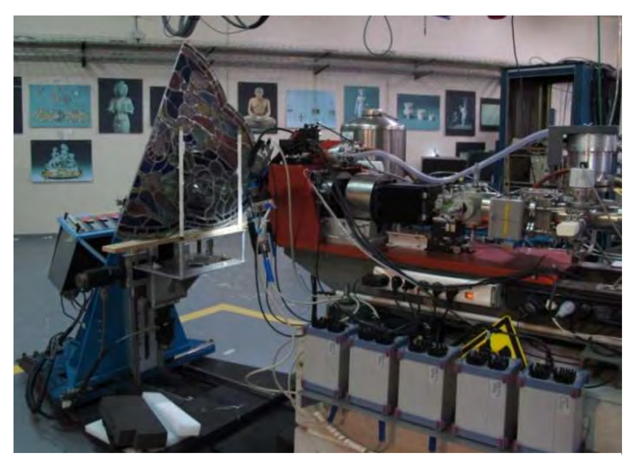


Figure 56 : analyse des verres d'un panneau de la Sainte-Chapelle de Paris par les méthodes PIXE-PIGE sur l'accélérateur AGLAE.

En concertation avec la conservation régionale des monuments historiques de la région Centre, un projet de recherche a donc été lancé en 2006 ; l'objectif étant d'analyser, de manière systématique, les verres de toutes les baies de la cathédrale de Chartres en cours de restauration. Le projet s'est étendu ensuite à d'autres édifices, notamment à la Sainte-Chapelle de Paris lors des importantes campagnes de restauration menées depuis 2011.

La caractérisation chimique des différents matériaux, verres et peintures, présente un double intérêt : la recherche de marqueurs technologiques d'une part et la recherche de marqueurs d'altération d'autre part. L'analyse quantitative des matériaux (éléments majeurs et traces) permet en effet d'établir la nature des matières premières utilisées (vitrifiant, fondant, chromophores) et éventuellement de rechercher leur provenance. Par ailleurs, ces données peuvent permettre d'étudier les liens entre composition et altération. Enfin, ces résultats permettront d'étoffer une base de données rassemblant la composition des verres de vitraux en fonction de leur époque de fabrication.

Cette démarche systématique a pour but d'améliorer notre connaissance des verres de vitraux, d'établir des rapprochements entre différents ensembles et de définir des provenances éventuelles. Ce programme de recherche est réalisé en collaboration étroite avec les historiens du centre André Chastel (UMR 8150).

Collaboration : C2RMF (Claire Pacheco, Quentin Lemasson, Laurent Pichon, Brice Moignard), Centre André Chastel (UMR 8150, Claudine Lautier, Karine Boulanger, Michel Hérold).

Personnel permanent : Claudine Loisel, Fanny Bauchau.

Communications sans actes :

Leroux L., Loisel C. 2014. Les apports des études scientifiques pour la conservation-restauration des vitraux de la Sainte-Chapelle de Paris. *Le travail au Moyen Âge : techniques, production, marchés, séminaire, Saint-Denis, France, Université Paris 8, 24 avril 2013.*

Lautier C., Loisel C. 2014. Étude des vitraux de la façade occidentale récemment restaurés : les fenêtres romanes et la rose gothique. *La cathédrale Notre-Dame de Chartres, Chartres, 7 novembre 2014.*

CAVIAR – Calcaires et vitraux : application des outils isotopiques ($_2$H, $_{18}$O,$_{29}$Si) pour l'étude des mécanismes d'altération des matériaux du patrimoine

Durée : septembre 2012 - octobre 2014

L'approche développée dans le projet CAVIAR a consisté à utiliser des traceurs isotopiques (^{2}H, ^{18}O et ^{29}Si) et des outils géochimiques appropriés pour l'étude spécifique des mécanismes d'altération des pierres calcaires et des verres de vitraux. Des méthodes de caractérisation ont été validées et adaptées aux structures des matériaux étudiés afin de :

- déterminer les chemins et les vitesses de circulation de l'eau au sein des réseaux poreux grâce à un marquage au deutérium (D_2O) ;
- localiser les zones de dissolution/précipitation grâce à l'oxygène (^{18}O) et au silicium (^{29}Si) ;
- déterminer les cinétiques de circulation d'eau et de réaction permettant de comprendre le rôle des produits d'altération sur l'évolution des matériaux au cours du temps.

Concernant les calcaires, le choix s'est porté sur la pierre de « Saint-Maximin roche fine » sélectionnée en carrière ainsi que différents faciès en œuvre sur la cathédrale de Saint-Denis, le tribunal administratif et le bâtiment de la Comédie de Paris. L'analyse de ce corpus d'échantillons altérés par vieillissement naturel a permis de constituer une base servant de référence de faciès d'altération pour ces pierres exposées à une atmosphère urbaine réelle. Un protocole d'altération initial a été mis en place dans la chambre de simulation CIME. Il a permis de contrôler les processus de dépôt sec ayant lieu en atmosphère urbaine, de préciser les conditions optimales de sulfatation et d'identifier des sites préférentiels de croissance cristalline.

Une première expérimentation d'altération en laboratoire a été réalisée par simulation de dépôt humide et traçage isotopique en $D_2{}^{18}O$ sous la forme d'imbibitions capillaires pendant des durées croissantes (7, 14, 28 jours) puis de cycles d'imbibition-séchage pendant 21 jours. L'évolution des propriétés macroscopiques (cinétique de transfert capillaire), topographique (rugosimétrie), microsctruturale (porosimétrie au mercure et tomographie X) et géochimiques (ICP, nanoSIMS) varie selon les conditions d'altération et révèle la grande efficacité des conditions altérantes par cyclage (variations d'humidité). Dans ce cas, l'altération correspond simultanément à une dissolution sélective qui conduit à une diminution de la rugosité de surface mais à une augmentation de la porosité, en particulier des accès aux pores.

Afin de reproduire cette alternance de périodes sèche et humide, un second protocole expérimental de simulation de

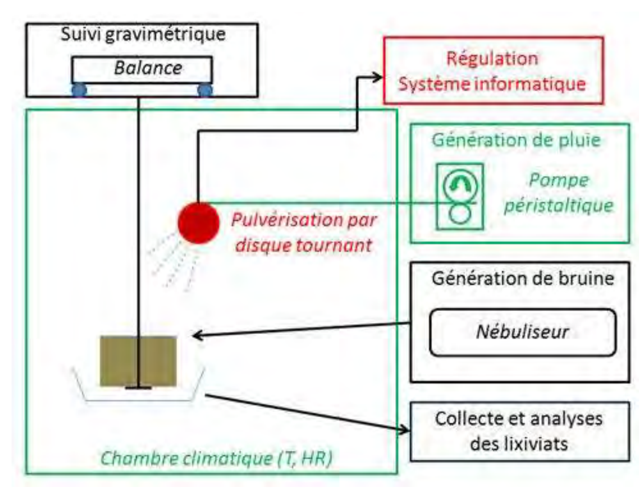


Figure 57 : simulation expérimentale des bruines sur pierre calcaire

bruine a été mis en place à partir d'une eau de pluie synthétique marquée (H_2O et $D_2{}^{18}O$) pour des durées expérimentales comprises entre 1 semaine et 3 mois. La complémentarité des informations tirées des cinétiques de transfert d'eau et des distributions porales souligne un colmatage progressif du réseau poreux qui n'affecte que la subsurface de la pierre, et qui ne devient perceptible qu'à partir de 3 mois. La reconnaissance de phases soufrées identifiées à une échelle submicroscopique (nano-SIMS) confirme que les premiers stades de l'altération ont lieu en subsurface et que les zones intragranulaires ne sont pas affectées par la précipitation de phases. Les outils mis en place permettent de contrôler la compétition entre ces deux processus d'altération et de suivre la dualité qui s'établit entre la dissolution et la précipitation de phases secondaires néoformées (gypse).

Concernant les verres, nous disposons d'échantillons de verres synthétiques dont les compositions sont proches de celle des verres de vitraux potasso-calciques. Le premier (VKP) a été élaboré à la Station expérimentale du verre de Murano et le second (VK) au LDMC (CEA Marcoule). Pour les échantillons anciens altérés à long terme, nous avons sélectionné deux échantillons de vitraux anciens qui ont été étudiés dans le cadre de deux PNRCC : « Vitrail et environnement atmosphérique : simulation et modélisation de l'altération de verres médiévaux » (2006-2008) et « Analyse mécanistique de l'altération des verres de type médiéval » (2009-2011). Le premier échantillon (Ou2) est un verre de vitrail qui provient de l'église Saint-Ouen de

Rouen, le second (Ev1) de la cathédrale Notre-Dame d'Évreux. Tous les deux datent du XIV[e] siècle et ont été déposés lors d'une restauration dans les années 1960-1970. Ils ont donc subi une altération au contact de l'atmosphère d'environ 650 ans. Nous avons également choisi des échantillons de vitraux altérés à court terme issu du PNRCC de T. Lombardo (2009-2011). Ces verres modèles potasso-calciques ont été altérés sur l'ancienne plate-forme d'exposition des matériaux du LISA en haut de la tour nord de l'église Saint-Eustache (Paris 1[er]) sur une durée pouvant aller jusqu'à 4 ans (Gentaz et al., 2011, 2012). Les conditions environnementales ont également été suivies. Trois échantillons de verres modèles ont ainsi été sélectionnés avec des épaisseurs d'altération similaires, de l'ordre d'1 µm : KP3 : altéré en conditions non abritées de la pluie (P) pendant 3 mois (3) ; KP6 : altéré en conditions non abritées de la pluie (P) pendant 6 mois (6) ; KA36 : altéré en conditions abritées (A) pendant 36 mois (36).

Si l'altération des verres de vitraux a bien été caractérisée du point de vue morphologique et de la description chimique et minéralogique des produits d'altération, on connaît moins leur cinétique d'altération. Pour cela, nous avons altéré le verre VK en conditions dynamiques pour mesurer la vitesse initiale en fonction du pH de la solution. Ainsi, un nouveau dispositif expérimental MCFT (« MicroChannel Flow Through ») a été mis en place en collaboration avec Y. Inagaki (Inagaki et al., 2012).

D'autre part, l'approche développée dans le projet CAVIAR consiste à utiliser des traceurs isotopiques ($_{2}$H, $_{18}$O et $_{29}$Si) pour l'étude spécifique des mécanismes de l'altération des verres de vitraux.

- Déterminer les chemins et les vitesses de circulation de l'eau au sein du matériau grâce à un marquage au D_2O (NanoSIMS).
- Localiser les zones de dissolution / précipitation grâce à l'oxygène ($_{18}$O) (NanoSIMS) et au silicium ($_{29}$Si) (SIMS).
- Déterminer les cinétiques de circulation d'eau et de réaction et comprendre le rôle des produits d'altération sur leur évolution au cours du temps.

D'autres techniques ont permis d'avancer dans la compréhension des processus : l'ICP-AES, la tomographie par absorption des rayons X, la rugosimétrie ainsi que des essais d'analyses par porosité mercure et surtout les techniques d'analyses multi-échelles (MEB-EDS, microscopie).

Pour les vitraux, une meilleure compréhension des mécanismes d'altération a été acquise grâce en particulier à l'expérience marquée en $_{29}$Si. En effet, on observe différents produits d'altération formés chacun par des mécanismes différents : (1) une fine couche de verre hydraté, (2) un gel qui se forme par interdiffusion, mais également par des réactions locales d'hydrolyse / condensation et (3) des phases secondaires précipitées. Par la suite, ces produits se fissurent lorsque l'épaisseur des couches augmente et sous l'effet de la variation des conditions environnementales.

Collaboration : LISA UPEC (Aurélie Vernet-Carron, Mandana Saheb, Anne Chabas, Tiziana Lombardo), ISTO Orléans (Olivier Rozenbaum)- Université de Besançon (Jean-Pierre Sizun).

Personnel permanent : Jean-Didier Mertz, Claudine Loisel, Fanny Bauchau.

CDD et vacations : Estel Colas, Anne Michelin.

Stagiaires Master 2 : Henrico Alphonse, Nita Bhudoye.

Communication orale avec actes :
Saheb M., Mertz J.D., Colas E. *[et al.]*. 2013. Multiscale characterization of limestone used on monuments of cultural heritage. *In* : *2013 MRS Fall meeting & exhibit, Boston, Massachusetts, December 1-6, 2013*, Warrendale (Pennsylvania, EU), Materials research society, vol. 1656, réf. PP3.07, 6 p.

Communication orale sans actes :
Saheb M., Chabas A., Michelin A., Mertz J.D., Colas E. *[et al.]*. 2013. Isotopic labeling for the understanding of the alteration of limestone used in built cultural heritage. *2013 MRS Fall meeting & exhibit, Boston, USA, 1-6 December 2013.*

Saheb M. [...] Mertz J.D., Colas E. *[et al.]*. 2013. Utilisation d'outils isotopiques pour l'étude de l'altération de calcaire. *14[e] congrès français de sédimentologie, Paris, 5-7 novembre 2013.*

Verney-Carron A., Michelin A., Gentaz L. [...], Loisel C. 2013. Role of the altered layer on the alteration kinetics of medieval stained glasses in atmospheric medium. *In* : *2013 MRS Fall meeting & exhibit, Boston, Massachusetts, December 1-6, 2013*, Warrendale (Pennsylvania, EU), Materials research society, vol. 1656, 12 p.

Financement : PNRCC - Ministère de la Culture et de la Communication.

Montant : 53 976 €.

Étude du phénomène de brunissement des vitraux médiévaux

Les vitraux du Moyen Âge, dont les pièces de verre contiennent du manganèse, sont fréquemment atteints d'une pathologie communément appelée « brunissement ». Ce phénomène, qui se traduit par la présence de taches brunes riches en manganèse en surface ou subsurface du verre, n'est pas parfaitement compris à ce jour. La perte totale de transparence du verre et l'impossibilité de lecture de l'œuvre (FIG. 58 et 59) qui en découlent font du diagnostic et du traitement de ce phénomène des enjeux fondamentaux pour la conservation-restauration des vitraux en France et au niveau mondial. Actuellement, l'absence de traitement est préconisée, ce qui ne satisfait ni les architectes, ni les conservateurs. Afin de répondre à leurs attentes, deux axes de recherche ont été développés :

- la compréhension des processus physico-chimiques mis en jeu dans le phénomène de brunissement ;
- et la recherche de traitements efficaces, non dommageables pour le verre et durables. Pour cela, plusieurs programmes de recherche et collaborations ont été mis en place.



Figure 58 : baie 11, collégiale Saint Etienne d'Eymoutiers. Médaillon, vue en lumière réfléchie de la face interne.



Figure 59 : baie 11, collégiale Saint Etienne d'Eymoutiers. Médaillon, vue en lumière transmise de la face interne.

Le phénomène de brunissement des vitraux médiévaux : critères d'identification et nature de la phase d'altération.

Contrat doctoral (UPEM)

Durée : octobre 2009- décembre 2013

La connaissance approfondie des processus physico-chimiques à l'origine du phénomène de brunissement est nécessaire pour proposer des réponses aux questions et aux attentes des conservateurs et des restaurateurs. Au cours de cette thèse, un panel de 24 échantillons de verres de vitraux historiques et de 3 échantillons archéologiques ont été étudiés par des méthodes microscopiques et spectroscopiques afin d'abord, d'établir des critères d'identification du phénomène de brunissement dû au manganèse, et par la suite, d'obtenir des informations sur la nature des phases brunes et sur le degré d'oxydation du manganèse dans ces phases. Parallèlement à l'étude des échantillons anciens, des verres modèles de composition proche de celle des vitraux médiévaux ont été synthétisés avec deux objectifs : d'une part la compréhension de la réaction entre le manganèse et le fer et de l'influence des paramètres de fabrication sur la couleur des verres, et d'autre part l'étude de l'influence possible des bactéries dans le développement du phénomène de brunissement.

Du fait de sa position à l'interface entre archéométrie, microbiologie et physique, ce sujet de thèse a été mené par un étudiant pluri-disciplinaire. Celui-ci a bénéficié d'un comité de pilotage composé d'experts en microbiologie, structure des verres et matériaux du patrimoine.

Étude du PHEnomène de Brunissement de vitraux médiévaux : facteurs d'influence et mécanismes élémentaires (EPHEB)

Programme national de recherche sur la connaissance et la conservation des matériaux du patrimoine culturel (PNRCC)
Durée : septembre 2011-septembre 2013

Ce programme a été réalisé en étroite collaboration entre le Laboratoire de recherche des monuments historiques et le Laboratoire géomatériaux et environnement de l'université Paris-Est-Marne-la-Vallée (UPEM)

La caractérisation visuelle et chimique d'échantillons historiques réalisée lors de ce projet, parallèlement au travail de thèse précédemment décrit, a permis d'optimiser les critères permettant le diagnostic du brunissement des verres. Il a été montré que la présence de taches brunes ne suffit pas à signer la présence de la pathologie du brunissement. L'observation visuelle est insuffisante et un diagnostic assuré nécessite des analyses chimiques afin de mettre en évidence la présence de manganèse.

En parallèle, une synthèse des traitements existants à base d'agents réducteurs a été menée. Six d'entre eux ont été testés afin de valider les protocoles mis en place lors de précédentes études et de mieux comprendre les différents effets induits par l'utilisation de ces agents. Deux agents montrant une efficacité satisfaisante (chlorhydrate d'hydroxylamine et hydrogénosulfite de sodium) ont été testés sur différentes pièces de verre et dans différentes conditions de pH et de concentration. Un éclaircissement a été observé, mais l'innocuité sur les échantillons et en particulier sur la couche d'altération est incertaine. D'autre part, la durabilité des traitements doit être évaluée en suivant notamment l'apparition d'un éventuel rebrunissement.

Par ailleurs, dans le cadre de ce projet, une collaboration avec le Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung (BAM) de Berlin a pu reprendre. Les deux institutions, LRMH et BAM bénéficient d'une ancienne collaboration initiée dans le cadre du programme franco-allemand (1990 – 1996). Les nombreux échanges actuels ont permis de faire le point sur les traitements du passé que ce soit en Allemagne ou en France et d'envisager un suivi des sites traités. Ce projet a été ainsi l'occasion de mettre en place, en France, un suivi *in situ* de l'évolution du brunissement sur plusieurs sites : cathédrale de Tours, cathédrale de Strasbourg, église de Pont-Sainte-Marie dans l'Aube, église de Les Junies dans le Lot.

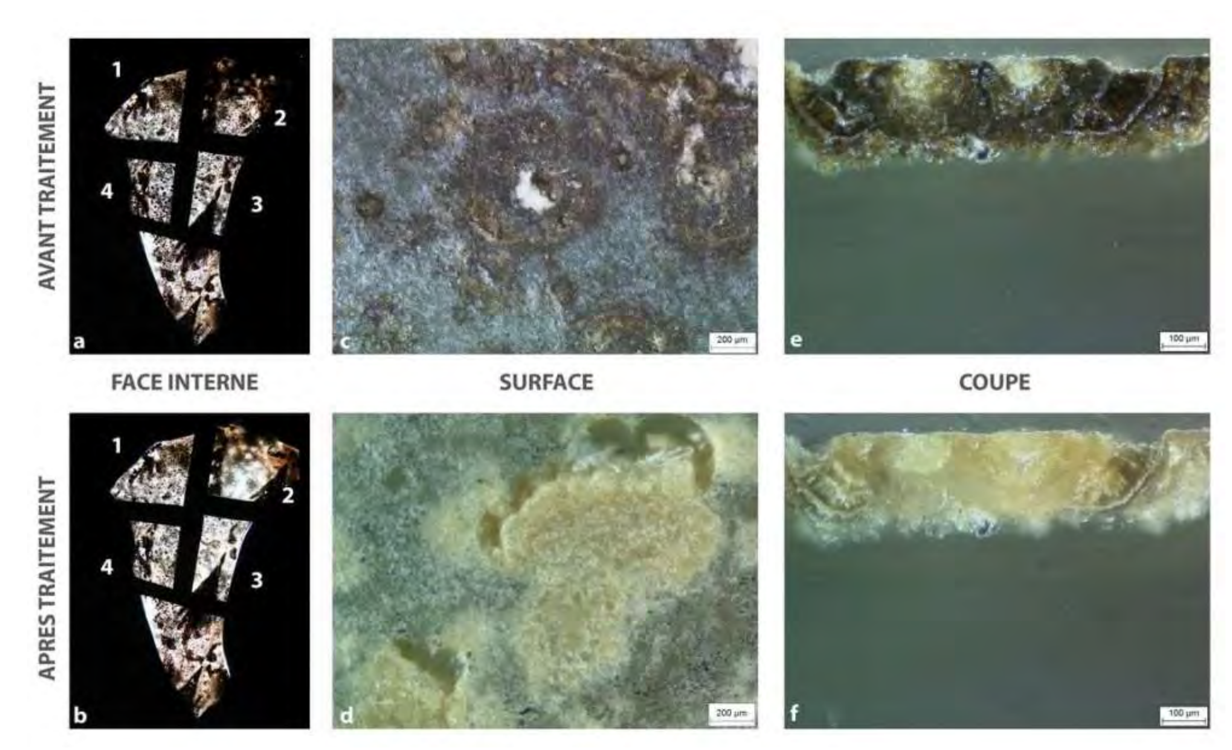


Figure 60 : microscopie en lumière transmise avant (a) et après (b) traitement de l'échantillon PENI par l'acide oxalique (1), le chlorhydrate d'hydroxylamine (2), l'hydrogénosulfite de sodium (3) et le BDG 86 Azzurro® (4). Microscopie optique en lumière réfléchie de la surface (c et d) et de la section (e et f) d'une zone brune avant (c et e) et après (d et f) traitement au chlorhydrate d'hydroxylamine.

Collaboration : université Paris-Est Marne-la-Vallée, Laboratoire géomatériaux et environnement (Stéphanie ROSSANO, Éric VAN HULLEBUSCH).

Personnel permanent : Fanny BAUCHAU, Claudine LOISEL, (pôle Vitrail) Faisl BOUSTA, Alexandre FRANÇOIS, Geneviève ORIAL (pôle Microbiologie).

Doctorant : Jessica FERRAND (université Paris-Est Marne-la-Vallée).

Stagiaire : Élisabeth VENAULT DE BOURLEUF (université Sorbonne-Paris 1, Master 2 en conservation-restauration des biens culturels).

Publications[1] :

VENAULT DE BOURLEUF É. 2013. *Caractérisation du phénomène de brunissement du vitrail et évaluation de traitements de réduction.* CeROArt [en ligne], mis en ligne le 11 mai 2013, http://ceroart.revues.org/3237.
VENAULT DE BOURLEUF É. […] LOISEL C., BAUCHAU F., BOUSTA F., ORIAL G., FRANÇOIS A. […] PALLOT-FROSSARD.I. 2013. Étude du phénomène de brunissement de vitraux médiévaux = The browning phenomenon of medieval stained-glass windows : poster. *In :* MAX-COLINART S., coord. *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 20 et 21 novembre 2012*, Paris, ministère de la Culture et de la Communication, p. 115-119.

Communication orale avec actes :
VENAULT DE BOURLEUF É., LOISEL C., BAUCHAU F., FERRAND J., ROSSANO S., PALLOT-FROSSARD I. 2013. The browning phenomenon on stained-glass windows: characterisation of the degradation layer and evaluation of selected treatments. *In* : RÖMICH H., VAN LOOKEREN CAMPAGNE K., ed. *Recent advances in glass, stained-glass, and ceramics conservation: ICOM-CC Glass and ceramics working group interim meeting and forum of the international scientific committee for the conservation of stained glass (Corpus Vitrearum-ICOMOS), Amsterdam, October 2013,* Zwolle (The Netherlands) : Spa Uitgevers, p. 191-200.

Impact :

FERRAND J. 2014. *Le phénomène de brunissement des vitraux médiévaux : critères d'identification et nature de la phase d'altération.* Thèse de doctorat : Géomatériaux : Paris, Université Paris-Est, 208 p.
FERRAND J., ROSSANO S., LOISEL C., TRCERA N., FARGES F., VAN HULLEBUSCH E., BOUSTA F., PALLOT-FROSSARD I. 2013. The browning phenomenon of medieval stained glass windows. *Conférence Goldschmidt 2013, Florence, Italy, 25-30 August 2013.*

Financement : contrat doctoral : bourse MENRT (Allocations de recherche du Ministère de la Recherche), EPHEB : MCC PNRCC.

Montant : 108 000 € (contrat doctoral).
45 000 € (EPHEB).

[1] Pour les publications antérieures à 2013 voir le bilan scientifique 2011-2012.

Réduction du manganèse oxydé des vitraux par extraits cellulaires de *Shewanella frigidimarina*

Bourse post-doctorale
Durée : octobre 2013 - mars 2014

Lors du PNRCC précédemment décrit, une synthèse des traitements chimiques utilisés pour remédier à la pathologie du brunissement a été réalisée. Plusieurs produits, réducteurs et chélateurs, ont été testés sur différentes pièces de verre. Certains agents ont montré une efficacité intéressante, cependant, l'innocuité des traitements sur le verre n'a pas été prouvée de manière certaine. Par ailleurs, l'utilisation de certains produits chimiques testés présente un risque pour le restaurateur qui opère en atelier. La recherche d'un traitement « vert », préservant les verres anciens et non toxique pour l'opérateur, a alors été menée et a permis d'envisager la possibilité de réduction du manganèse par voie enzymatique. Pour cela, la bactérie *Shewanella frigidimarina,* bactérie marine capable de réduire les métaux comme le manganèse et le fer, a été sélectionnée. Des essais de réduction sur poudre d'oxyde de manganèse (Mn(IV)), puis sur vitraux atteints par la pathologie ont été réalisés. Plusieurs solutions (solution bactérienne de *Shewanella frigidimarina,* solution d'extraits cellulaires) et moyens d'application (liquide, gel) ont été testés. Ces traitements ont permis d'obtenir des résultats prometteurs (éclaircissement du brunissement), mais la caractérisation des matériaux après traitement et l'évaluation de leur durabilité doivent encore être réalisées.

Collaboration : université Claude-Bernard Lyon 1, Institut de chimie et biochimie moléculaires et supramoléculaires, UMR 5246 (Loïc Blum, Christophe Marquette)

Personnel permanent : Faisl Bousta, Claudine Loisel, Fanny Bauchau

Post-doctorant : Alicia de Lera (université du Pays basque)

Financement : bourse post-doctorale du gouvernement du Pays basque, Espagne

Étude et modélisation des transferts hydriques et thermiques au sein des matériaux poreux : application aux matériaux du patrimoine bâti ancien, exemple del'Hypogée des Dunes à Poitiers et de la crypte de l'abbatiale de Saint-Savin-sur-Gartempe

Durée : septembre 2010– novembre 2013

Les monuments historiques sont soumis à de nombreuses altérations. L'eau est le principal vecteur de ces altérations en favorisant des réactions physiques, chimiques ou encore biologiques, notamment dans les sites confinés ou souterrains. Confrontée à la difficulté de recueillir des données fiables sur la teneur en eau effective des matériaux, cette thèse a permis de développer une méthode de mesure et d'étude du transfert de l'eau, de manière à la quantifier et à identifier son origine.

À terme, cette méthode est de nature à venir compléter le panel des techniques existantes permettant de mesurer une teneur en eau des matériaux. Dans le domaine de la conservation, les matériaux utilisés pour la construction doivent être caractérisés vis-à-vis de leurs propriétés de transferts thermique et hydrique. En parallèle, le développement actuel des techniques permet d'envisager des méthodes d'investigation dans le cadre d'un monitoring non intrusif.

Le premier volet de la recherche a concerné le développement et la mise au point, puis la validation d'un capteur de teneur en eau utilisable sur les matériaux inorganiques poreux (pierre, béton, enduit). Dans cet objectif, la voie suivie a été d'adapter la mesure de conductivité thermique par une méthode simplifiée du fil chaud aux pierres de taille utilisées en restauration. Afin de transférer cette technologie conçue pour les fluides vers les matériaux solides consolidés, plusieurs étapes ont été effectuées :

- des mesures avec le fil intégré dans le matériau, au sein d'assemblages de billes de verre, dans des briques de terre crue et des briques de béton de chaux-chanvre. Les résultats obtenus permettent de calculer une conductivité (λ_1) « à court terme » qui caractérise la microstructure et l'état d'humidité du matériau et une conductivité effective (λ_2). L'effet de la « microstructure » est gouverné par la densité de contact entre les particules solides et le fil chaud. L'effet de l'état d'humidité est régi par les différences de conductivité thermique entre l'air et l'eau ;
- des mesures de surface, le fil chaud est alors plaqué sur le matériau par l'intermédiaire d'un isolant. Les essais ont été effectués sur les mêmes matériaux que précédemment, mais ont été étendus à plusieurs lithotypes calcaires de la vallée de la Loire ainsi qu'au grès de Fontainebleau. Ces pierres, de compositions minéralogique et microstruturale très variables, ont été entièrement caractérisées d'un point de vue pétrophysique afin de sélectionner des échantillons aux propriétés spécifiques. L'influence de l'état de surface, déterminant pour assurer un contact fil/substrat optimal, a été contrôlée par rugosimétrie.

La méthode du fil chaud fournit des résultats intéressants, mais semble atteindre ses limites pour les teneurs en eau faibles et des taux de saturation inférieurs à 25 % (ϕ < 25 % (vol.). Des développements ultérieurs sont également nécessaires afin de miniaturiser l'équipement de mesure. La technique est néanmoins très performante en fonctionnement « tout ou rien ».

Le second volet de la recherche traite de deux suivis microclimatiques réalisés sur deux sites historiques majeurs : l'hypogée des Dunes à Poitiers et l'abbatiale de Saint-Savin-sur-Gartempe.

L'hypogée est une chapelle funéraire du VIIe siècle, redécouverte à la fin du XIXe siècle. Suite aux aménagements effectués pour l'ouverture au public, de nombreuses dégradations sont apparues (algues, lichens, rendant le site illisible et provoquant sa fermeture en 1998. Des travaux de nettoyage et d'aménagement lourds ont alors été entrepris. La recherche a consisté à évaluer l'influence de ces travaux sur les caractéristiques du microclimat dans l'hypogée (Fig. 62).

À Saint-Savin-sur-Gartempe, l'abbatiale inscrite sur la liste du patrimoine mondial, est ornée de nombreuses peintures murales du XIIe siècle. Surnommée la « Sixtine Romane », l'état de conservation des peintures reste fragile. Dans la crypte, un voile blanchâtre d'origine biologique et localement minéral (sels) persiste. Il recouvre la quasi-totalité des peintures et réapparait régulièrement après nettoyage. L'étude a permis de caractériser l'influence des variations climatiques sur la formation de ce voile, de

réaliser un bilan hydrique et hygrique complet au sein de cette crypte, mettant en évidence l'effet spécifique de la pluviométrie, du battement de la nappe, du niveau de la Gartempe et des paramètres microclimatiques à l'intérieur du site. Ces résultats ont été acquis en appliquant l'analyse corrélatoire au traitement des données du climat, méthode largement utilisée en traitement du signal et depuis peu en hydrogéologie (FIG. 63).

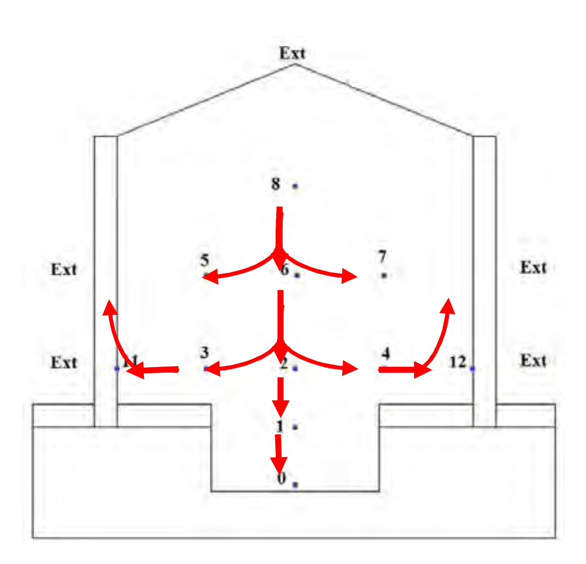


Figure 61 : sens des convections de l'air en été, établi à partir des corrélations de température dans l'hypogée des Dunes à Poitiers.



Figure 62 : dispositifs de mesure de T et HR dans la crypte de l'abbatiale de Saint-Savin-sur-Gartempe.

Collaborations : ENSIP Laboratoire IC2MP (Patrick DUDOIGNON, directeur de thèse), ERM (Jean-Claude PARNEIX), Institut Pprime de l'université de Poitiers (Jean-Philippe GARNIER), DRAC-CRMH Poitou- Charentes (Jean-Pierre CRÉMIER).

Doctorant : Benoît MERCKX.

Personnel permanent : Jean-Didier MERTZ (co-directeur).

Communication orale avec actes :

MERCKX B., MERTZ J-D, DUDOIGNON P., GIOVANNACCI D., GUIAVARC'H M. (2013) - Influence de la microstructure et de la rugosité de surface sur la détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud, *XIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes*, CIFQ2013, Reims 3-5 juin 2013, p.145-150.

MERCKX B., MERTZ J.-D, DUDOIGNON P., GIOVANNACCI D., GARNIER J.-P. (2013) - Relationship of roughness of building stones on the effective thermal conductivity determined by transient hot-wire method, EGU 2013, General Assembly 2013, *Geophysical Research Abstracts*, Vienna, April 7-13th 2013, vol. 15, EGU2013-11707.

Communication orale sans actes :

MERCKX B., RADIMY R.T., MERTZ J.-D, DUDOIGNON P. (2013) - Mesure de conductivité thermique en surface par la méthode du fil chaud : Application au bâti ancien et aux sols argileux - *Congrès GFHN2013*, ENSIP, Poitiers 18-21.11.2013.

Financement : Thèse CIFRE, DRAC Poitou-Charente et ANRT.

Montant : 114 157 €.

Étude sur la provenance des albâtres conservés dans les collections publiques françaises

Durée : septembre 2013 – septembre 2014

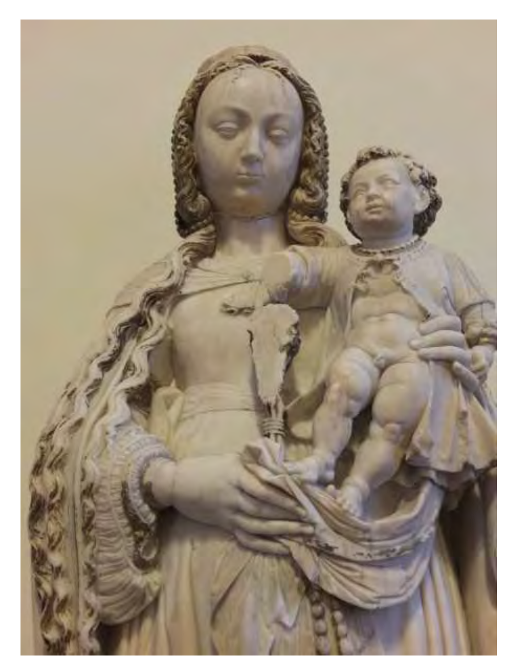


Figure 63 : Vierge du Breuil (ECl. 11662), Écouen, musée National de la Renaissance (photo Estelle Saint-Omer).

Ce projet de recherche (N° PATRIMA AAP 2013 07) fait directement suite à un premier projet sur des albâtres réalisé en 2012-2013 (N° PATRIMA AAP 2 06), et a bénéficié d'une collaboration avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et le Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine (CICRP) (financement d'analyses).

L'albâtre, variété noble du gypse ($CaSO_4.2H_2O$) et/ou de l'anhydrite ($CaSO_4$), a été utilisé pour des œuvres d'art à toutes les époques, mais plus particulièrement en Europe entre les XIVe et XVIIe siècles. Sa texture fine et homogène, sa couleur blanche et translucide, et sa faible dureté, le rendent aisé à travailler et permettent une sculpture de grande finesse, fréquemment polychrome. À l'instar des marbres blancs, l'identification de l'origine des albâtres est problématique en raison de la grande homogénéité du matériau, et de l'absence de signes distinctifs pétrographiques. Les analyses visuelles, en microscope optique et électronique, ou minéralogiques permettent des déterminations de base (présence de gypse, d'anhydrite, de baryum, de strontium,…), mais ne sont pas discriminantes pour tracer une provenance géographique.

Les investigations géochimiques se heurtent à la variabilité des éléments traces, menant à une superposition des compositions entre différents gisements. Des analyses réalisées sur une vingtaine d'échantillons entre 2009 et 2011, dans le cadre d'une collaboration entre le LRMH, le BRGM et le CICRP (BRGM - analyses par ICP-AES), et par ailleurs avec le C2RMF (PIXE-PIGE sous faisceau AGLAE), avaient montré la non-validité de ces traceurs, notamment du fait de l'absence de dosage des terres rares.

La combinaison des dosages des isotopes stables du soufre et de l'oxygène contenus dans les sulfates constitutifs de l'albâtre (gypse et/ou anhydrite) et de l'analyse isotopique du strontium, qui est un élément très fréquent dans ces matériaux, sous la forme de célestine, a été utilisée pour la première fois en 2010 dans l'étude préliminaire citée plus haut, ainsi que dans ces deux projets successifs du LabEx Patrima. Les dosages ont été réalisés au BRGM à Orléans et sont exprimés sous la forme de rapports isotopiques ($^{18}O/^{16}O$ exprimé en "δ‰ vs SMOW", $^{34}S/^{32}S$ exprimé en "δ‰ vs CDT" et $^{87}Sr/^{86}Sr$). Il a été montré que cette méthode permet de tracer les origines des albâtres de plusieurs œuvres d'art françaises (Kloppmann et al., 2013, 2014)

Au total, 30 échantillons ont été analysés dans cette phase de projet menée en 2013-2014, provenant de sculptures d'Île-de-France, de Champagne ou du Dauphiné et de carrières. Ces œuvres présentant soit un intérêt du point de vue de la période de réalisation, soit du point de vue de la localisation géographique, et permettent de définir au mieux les zones de diffusions ont été sélectionnées. Parmi les sculptures soumises au prélèvement, citons la Vierge du Breuil (musée national de la Renaissance, Écouen), saint Jérôme (église Notre-Dame-de-Bonne-Nouvelle, Paris), la Vierge de l'Annonciation de Javernant (musée du Louvre, Paris), plusieurs élément des monuments funéraires des papes avignonnais (musée du Petit Palais, Avignon). Des échantillons des carrières de Malaucène (84), Moulidars (16), Thorigny-sur-Marne (77) Saint-Geniez (04), Boscodon (05) et Notre-Dame-de-Mésage (38) ont été choisis pour compléter le référentiel.

Ce travail de recherche a permis, pour la première fois, de répondre à des demandes de service du LRMH, dont l'étude du grand retable de l'église Notre-Dame de Calais (62). Les analyses isotopiques pour cette œuvre, comparées avec celles obtenues pour des échantillons de référence issus de carrières localisées en Europe, montrent une provenance anglaise (Fig. 64).

Ce projet sur l'identification de la provenance des albâtres se poursuivra en 2015, avec un travail plus spécifique sur les teneurs en terres rares (Programme « ALBATREE » - appel à projets Convergence « Sciences et Patrimoine culturel » du COMUE Sorbonne Universités ; Idex SUPER).

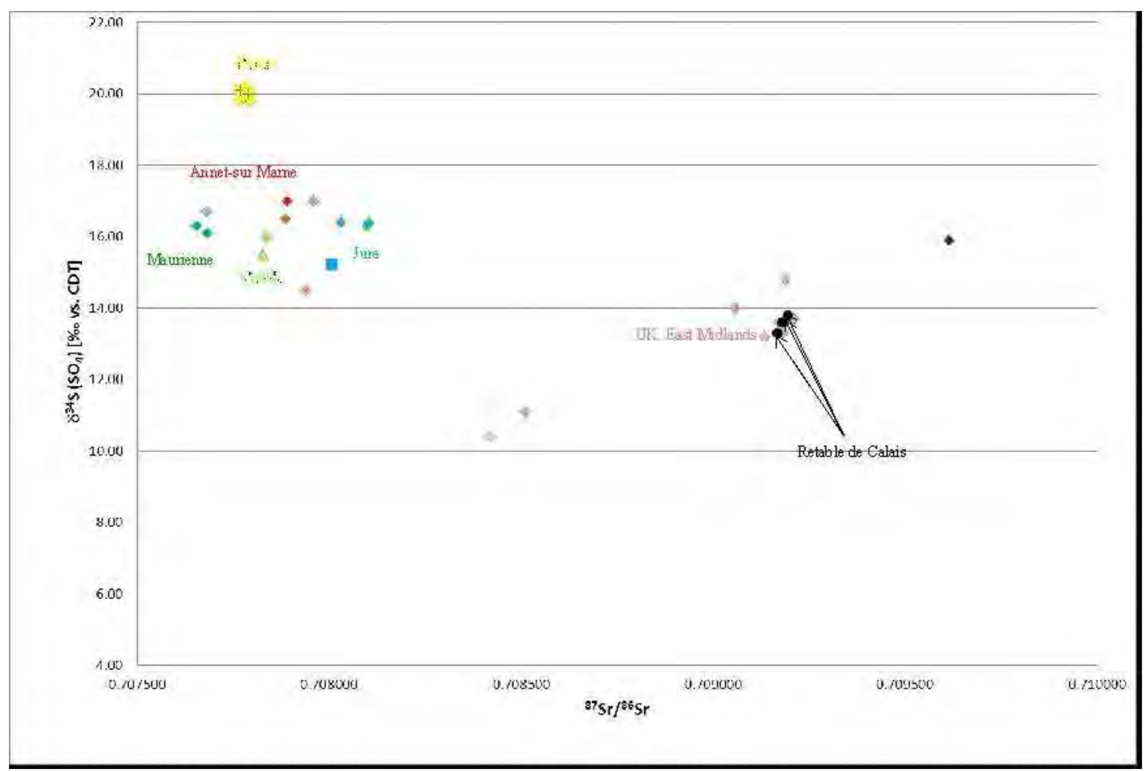


Figure 64 : rapports isotopiques du soufre et du strontium pour 3 échantillons du grand retable sculpté de l'église Notre-Dame de Calais (62) et des grands centres carriers européens produisant de l'albâtre – Ce graphique indique que la source anglaise.

Collaboration : Musée du Louvre (Département des sculptures), Université Versailles-Saint-Quentin, Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine (CICRP), avec la participation du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), de plusieurs musées français et conservations régionales des monuments historiques.

Personnel permanent : Lise Leroux.

Stagiaire : Estelle Saint-Omer (Musée du Louvre).

Publication : Kloppmann W., Leroux L., Bromblet P. *[et al.]*. 2014. Tracing medieval and renaissance alabaster works of art back to quarries: a multi-isotope (Sr, S, O) approach. *Archaeometry*, 56(2) : 203-219.

Communication orale sans actes :

Le Pogam P.Y., Leroux L. 2014. Alabaster mourners of the Tomb of Jean de France, duke de Berry (Étienne Bobillet, Paul Mosselmann, middle of the 15th century). Study: dialogue between a curator and a physicist in front of an artefact. *Synchrotron radiation and neutrons in art and archaeology conference (SR2A-2014), Paris, Musée du Louvre, 9-12 septembre 2014.*

Leroux L. 2013. Identification de la provenance des albâtres gypseux utilisés en sculpture. *Séminaire de recherche sur les carrières et la construction, LAMOP-UMR 8589, Université Paris I, 8 décembre 2013.*

Kloppmann W., Leroux L., Le Pogam P.Y. *[et al.]*. 2013. Origin of French 14th to 16th century alabaster artwork from Île-de-France assessed through multi-isotope archaeometry (S, O, Sr). *10th applied isotope geochemistry conference, Budapest, Hungary, 22-27 September.*

Financement : LabEx PATRIMA, BRGM, CICRP.

Montant : 10 000€ LabEx PATRIMA +23 000 € BRGM + 5 000€ CICRP.

Étude sur les peintures industrielles dans le patrimoine

Les peintures « industrielles », différentes des peintures artisanales, ont largement été utilisées aux XIXe et XXe siècles dans le domaine du patrimoine, que ce soit à des fins artistiques ou techniques (anticorrosion, imperméabilité). Les applications sont multiples aussi bien dans le domaine des monuments historiques que dans celui des musées (Fig. 66 et 67). La nature des peintures utilisées et les substrats concernés (métal, béton, polymères) sont également variés. Enfin, les progrès de la chimie ont conduit à la production de peintures de plus en plus efficaces mais aussi aux formules complexes. Aussi, il est aujourd'hui difficile de procéder à leur identification et à leur caractérisation dans le cadre d'opérations de conservation-restauration. Or ces peintures, qui ont souvent été mises en œuvre par les artistes, parfois plus concernés par leur texture, ou les palettes de couleurs et de brillance disponibles, que par les recommandations techniques des fabricants de peinture, présentent dans de nombreux cas des altérations notamment lorsque les œuvres sont exposées en extérieur. Qu'il s'agisse donc d'identifier ces peintures ou de préconiser des traitements de restauration, les problématiques sont complexes.

Dans ce contexte, le C2RMF, le CICRP et le LRMH (pôles Béton, Métal et Peintures murales et polychromie) ont uni leurs compétences pour créer un groupe de travail destiné à servir de plate-forme d'échange de connaissances et de savoir-faire, mais aussi dans le but de monter des études et projets de recherche collectifs. La première étape de ce travail consiste à explorer différentes sources d'archives (lieux potentiels identifiés lors des premières réunions du groupe), afin de recenser les produits et fabricants des périodes concernées (1850 à nos jours), mais aussi les règlementations et brevets… Ces données sont destinées à alimenter une base de données commune de produits (fiches techniques, références analytiques, et échantillons…). Dans cet objectif, le C2RMF, le CICRP et le LRMH ont obtenu un financement du ministère de la Culture et de la Communication pour 6 mois de vacations, réparties au sein des 3 structures, la vacataire étant amenée à travailler dans les domaines spécifiques de chaque institution (spécificités et lieux de documentation et d'archives identifiés).



Figure 65 : sculpture monumentale en béton projeté polychrome. Musée Robert Tatin de Cossé-le-Vivien (Mayenne, 53).



Figure 66 : grille du parc Monceau à Paris (VIIIe arrondissement).

Collaboration : Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine (CICRP).

Personnel permanent : Élisabeth Marie-Victoire, Annick Texier, Dominique Martos-Levif, Vincent Detalle.

CDD : Claire Valageas (Pour le LRMH : septembre – novembre 2014).

Communication orale sans actes :
Texier A. 2013. Peinture industrielle et patrimoine, du XIXe au XXe siècle. *Journées scientifiques et techniques du CEFRACOR, Paris, École nationale supérieure de chimie, 4-5 juin 2013*.

Impact : Patrimoine et peintures industrielles (Poster), Eurocoat 2014, salon et congrès internationaux pour les industries des peintures, encres d'imprimerie, vernis, colles et adhésifs, 23-25 Septembre 2014, Paris.

Financement : ministère de la Culture et de la Communication.

Montant : 3 mois de vacation.

GAODETER : implication de sels et micro-organismes dans la détérioration de grottes et abris ornés

Durée : septembre 2014 - août 2015

Les roches des parois des grottes et abris ornés de la préhistoire subissent des altérations liées à des processus physicochimiques, mais également liées à l'activité biologique des micro-organismes. Les minéraux soufrés des roches, tels que la pyrite, peuvent être dissous par les eaux de percolation, transportés dans les pores de la masse rocheuse et peuvent se recombiner avec le calcium des carbonates induisant des cristallisations du soufre sous forme de sulfate dihydraté de calcium : le gypse. L'activité microbienne peut intervenir dans ces phénomènes de précipitations de gypse par oxydation du soufre, ainsi qu'au préalable, dans la réduction des sulfates créant un fractionnement isotopique mesurable de l'oxygène et du soufre. Des variations climatiques peuvent influencer ces processus et impacter la conservation des grottes et abris ornés. L'objectif de ce projet est de déterminer la part des processus biologiques dans la formation et l'accumulation de sulfates dans une grotte et un abri ornés proches géographiquement. Deux sites préhistoriques inscrits sur la liste du patrimoine mondial seront étudiés : la grotte du Sorcier sur la commune de Saint-Cirq-du-Bugue et l'abri de Laugerie-Haute-Est sur la commune des Eyzies-de-Tayac-Sireuil. L'acquisition de données isotopiques en oxygène et soufre permettra de faire la part entre le soufre d'origine géochimique et le soufre lié à une activité biologique. En parallèle de ces analyses isotopiques, une étude de la diversité microbienne sera menée avec un focus particulier sur les micro-organismes métabolisant le soufre. Ces analyses géochimiques et biologiques seront complétées par des données climatiques. Des micro-organismes impliqués dans la cristallisation du soufre seront isolés pour pouvoir être étudiés en laboratoire. Une meilleure connaissance des processus biologiques impliqués dans l'accumulation de sulfates dans les grottes et abris ornés permettra d'améliorer les stratégies de conservation.



Figure 67 : cristallisation de gypse sur la paroi de la grotte du Sorcier (Saint-Cirq-du-Bugue, Dordogne).

Collaboration : Équipe de recherche sur les relations matrice extra-cellulaire-cellule (ERRMECe), (Patrick Di Martino, Agnès Mihajlovski, Damien Seyer).

Personnel permanent : Faisl Bousta, Alexandre François, Johann Leplat, Stéphanie Touron.

CDD : Clémentine Lepinay (contrat post-doctoral).

Financement : AAp LabEx Patrima 2014.

Montant : 67 622 €.

Influence des conditions environnementales sur le comportement mécanique des matériaux granulaires naturels du patrimoine bâti

Durée : octobre 2011 – avril 2015



Figure 68 : pierre soumise au gel sur l'église de Notre dame de Lure.

La composition minéralogique des matériaux du patrimoine bâti peut être plus ou moins réactive aux changements environnementaux que ce soient des variations de température (dilatation thermique de la calcite) ou d'humidité (dilation hygrique et hydrique des minéraux argileux ou dissolution du gypse). Ces variations au sein même des matériaux peuvent engendrer de fortes contraintes mécaniques aboutissant à des altérations macroscopiques importantes et diverses comme des fissures, des desquamations ou des désagrégations granulaires. L'objectif de l'étude est donc de relier l'influence des propriétés microstructurales et minéralogiques à des comportements macroscopiques et mécaniques majeurs en relation avec des figures d'altération des matériaux.

Les mesures de porosité et d'agencements granulaires seront associées aux propriétés mécaniques des matériaux sous différentes variations environnementales d'une part, et à l'étude des mécanismes de propagation de fissures (Ténacité-K_{Ic}, fissuration inter ou intra granulaire, etc.). Celles-ci permettront de comprendre les mécanismes de fissuration des matériaux poreux depuis l'échelle microscopique jusqu'à l'échelle macroscopique, et ainsi de dégager les paramètres essentiels influençant leur durabilité et leur cinétique d'altération. L'étude consiste en un suivi dynamique au cours des cycles d'altération par le gel-dégel, des changements déterminants dans le réseau poreux des matériaux altérés. L'étude porte essentiellement sur cinq calcaires aux propriétés microstructurales et mécaniques très variées : les calcaires de Massangis, Lens, Migné, Saint-Maximin et Savonnières et sur les fissurations liées aux cycles de gel-dégel.

Cette recherche a déjà montré qu'un lien direct existe entre l'évolution de la microstructure des pierres altérées et leurs propriétés mécaniques intrinsèques comme la ténacité, paramètre déterminant dans l'amorçage et la propagation de fissures.

Collaboration : Laboratoire de mécanique et matériaux du génie civil (L2MGC) – Université de Cergy-Pontoise (Albert Noumowé, directeur de thèse).

Personnel permanent : Ann Bourgès

Doctorant : Charlotte Walbert

Communication orale sans actes :

Walbert C., Eslami J., Beaucour A.L., Bourgès A., Noumowe A. 2014. Dégradation des propriétés mécaniques de différentes pierres de construction soumises à des cycles de gel-dégel. *32e rencontres universitaires de Génie civil, de la préservation à l'innovation, Orléans, 4-6 juin 2014*.

Financement : LabEx Patrima.

Montant : 105 000 €.

Influence des propriétés physico-mécaniques des minéraux argileux dans l'altération de la pierre monumentale

Durée : février 2014 – février 2017

Les matériaux de construction du patrimoine bâti français sont majoritairement des pierres sédimentaires qui présentent des microstructures aussi variées qu'hétérogènes. Les spécificités minéralogiques de ces pierres sont un facteur essentiel de leur durabilité, en particulier lorsqu'elles contiennent des minéraux argileux en quantité variable. Toutes les recherches suggèrent que c'est le gonflement des argiles, périodiquement répété, qui conduit à l'endommagement des pierres. Il en découle en effet une fatigue du matériau, propice à sa fragilisation, et à des altérations macroscopiques importantes, comme des fissures, des déplaquages et des desquamations (Fig. 70).

La recherche, menée au LRMH et au laboratoire de géologie de l'ENS-Ulm, consiste à mieux comprendre ces mécanismes d'altération, et à appréhender les paramètres déterminants dans l'initiation de la fissuration. Les types, la quantité et l'organisation des minéraux argileux au sein des pierres, ainsi que leur état hygrique sont pris en compte.

Figure 69 : phénomène de desquamation en plaque sur la molasse de Villarlod - Cathédrale de Fribourg.

Se fondant sur l'observation et la reconnaissance d'altérations par desquamation sur quelques édifices majeurs de notre patrimoine monumental, trois faciès ont été sélectionnés pour réaliser cette étude : une molasse, un grès et une kersantite. Ces pierres, qui couvrent une gamme de porosité étendue, se caractérisent toutes par un cortège argileux de nature et de répartition variables. Il en résulte une forte anisotropie de structure et de composition qui doit avoir un impact non négligeable sur le comportement macroscopique de ces pierres et par conséquent, sur la cinétique des altérations.

Cette recherche multi-échelle a pour but d'établir l'influence des propriétés physico-mécaniques des argiles sur l'initiation des désordres et les premières étapes de la dégradation, pour des conditions naturelles d'exposition, subies par la pierre monumentale. Une approche innovante couplant mécanique de la rupture et méthodes non destructives acoustiques est proposée pour étudier précisément les mécanismes de fissuration impliqués et définir un modèle de comportement hydromécanique.

Les apports de l'ENS dans cette recherche sont clairement identifiés et concernent la transposition d'une méthode éprouvée dans le suivi de fissuration par ondes acoustiques ; il est attendu que la méthode mise au point par l'ENS soit adaptée aux cas des altérations de surface des monuments.

Collaboration : Laboratoire de géologie – ENS-Ulm (Y. Guéguen, J. Fortin), université Pierre et Marie Curie (UPMC) – Paris 6 – ED 397.

Personnel permanent : Ann Bourgès (directrice de thèse), Jean-Didier Mertz.

Doctorant : Mathilde Tiennot.

Financement : LabEx MATISSE et ministère de la Culture et de la Communication.

Montant : 125 000 €.

La finition des fontes d'art

Durée : pluriannuelle

La fabrication des produits pour peinture est, au tournant des XIXe et XXe siècles, une industrie en plein essor. Les revêtements appliqués sur les fontes d'art visent à les protéger de leur environnement direct et probablement pour la plupart à leur apporter un aspect plus esthétique. Deux types de procédés de protection sont utilisés pour les fontes : les traitements par revêtement organique (huile, cire, peinture…) et les traitements par revêtement métallique de cuivre. Si les traitements organiques sont possibles dès le début du XIXe, le traitement par cuivrage n'est réalisable qu'à partir de la deuxième moitié du XIXe en France. Le revêtement organique peut être utilisé dans deux objectifs complétement différents : l'un va laisser voir le métal car ce traitement est « transparent » et il doit limiter la corrosion tout en magnifiant le matériau. L'autre va au contraire modifier l'aspect du matériau.

Au cours de ce travail, un essai de définition des différentes possibilités que sont le « bronzage », le « bronzé », la « bronzure »… a été tenté, tout en gardant à l'esprit que la séparation n'est pas si claire dans les ouvrages anciens. Une seconde partie concerne les paillettes et poudres métalliques, méthodes de fabrication, mode d'utilisation et paramètres du rendu esthétique de ces revêtements. En effet, outre la variabilité des compositions élémentaires observées lors des analyses, on constate différentes morphologies et orientations de ces paillettes. On cherche donc à relier la technique de fabrication de ces revêtements et aspects de finition de la surface des sculptures en fonte. En effet, le rendu optique des pigments métalliques est basé sur la réflexion de la lumière et, de ce fait, est différent de celui des pigments traditionnels à interférence. Cette réflexion est superposée à une diffusion de la lumière plus ou moins importante qui donnera une variété de brillance ainsi qu'un effet deux tons ou effet « Flop » (variation de la clarté d'extrêmement clair à très foncé en fonction de l'angle d'observation). Les paramètres influençant le rendu d'un pigment métallique sont le diamètre moyen, la morphologie, la distribution et l'orientation des particules dans la peinture (Fig. 70, 71, 72, 73). D'un côté, un pigment métallique peut être pelliculant, c'est-à-dire que les particules sont regroupées à la surface et parallèles à celle-ci. Le revêtement est alors très brillant, et les particules seront probablement plus facilement corrodées et abrasées. D'un autre côté, le pigment peut être non pelliculant, ce qui signifie que les particules sont dans le vernis, l'aspect sera métallique et coloré et certainement plus résistant aux altérations. Dans nos observations, le classement dans l'une ou l'autre des catégories, est complexe car nous travaillons sur des échantillons vieillis, usés. De plus, l'effet pelliculant est directement lié au produit utilisé lors de la préparation de ces poudres en particulier lors du polissage. L'aspect économique joue également un rôle sur le choix des revêtements employés comme en témoignent les recherches réalisées sur les décors de l'opéra Garnier et les éléments chiffrés trouvés dans des catalogues de fondeurs.

L'engouement pour les dépôts électrolytiques pourrait être expliqué par la défaillance des peintures utilisées pour la protection des ferreux en extérieur dans le courant du XIXe siècle. Ces nouveaux traitements, dont l'émergence est liée aux développements des connaissances techniques sur l'énergie électrique (pile, accumulateur, rhéostat, dynamo…) et à la compréhension des différents phénomènes mis en jeu, permettent de déposer un métal sur un autre métal ou sur une surface conductrice. Pour les fontes d'art, il s'agit du cuivrage. Pour ces revêtements métalliques, on trouve dans les ouvrages, des recettes de traitement pour de petites pièces de différents métaux, mais très peu pour la fonte et encore moins pour des œuvres monumentales. Un ouvrage sur l'électrolyse de 1892 nous a permis de trouver les différentes techniques employées sur la fonte d'art pour la seconde moitié du XIXe siècle.



Figure 73: fonte de fer recouverte d'un traitement à la poudre métallique.

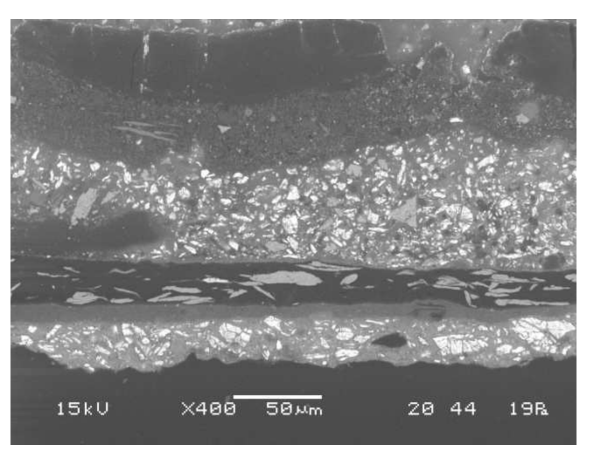


Figure 72: poudre de laiton lamellaire.

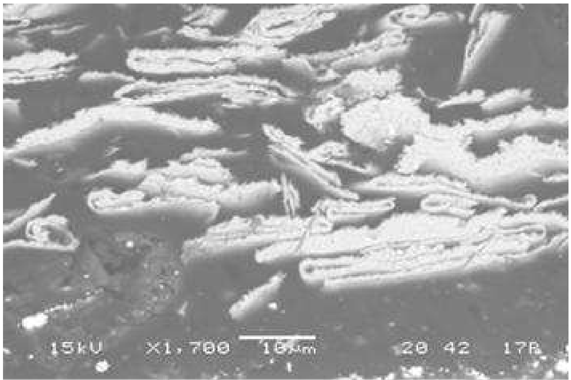


Figure 71: poudre probablement de cuivre électrolytique.

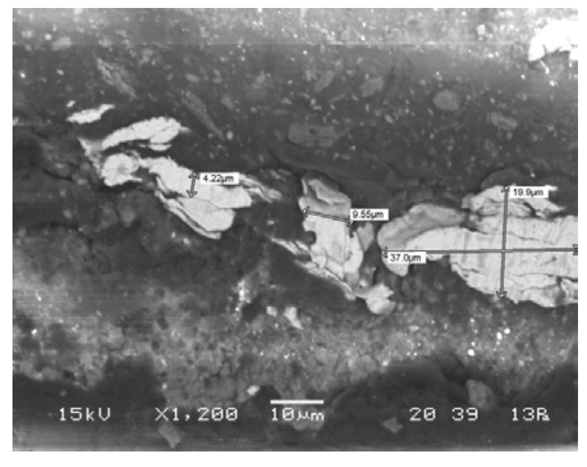


Figure 70 : poudre de laiton lenticulaire

Collaboration : projet interne

Personnel permanent : Annick TEXIER

Impact : Colloque « Métal à ciel ouvert », 4 au 6 décembre 2014, Paris.

Le plomb dans les monuments historiques

Cette thématique sur le plomb est développée au sein du pôle Métal depuis plusieurs années. L'emploi du plomb est relativement diversifié dans les monuments historiques puisqu'il est présent aussi bien en couverture, que dans les éléments décoratifs de toiture et dans les sculptures (fonction décorative), ou les vitraux ou encore associé au fer pour les éléments de structure dans la maçonnerie dès les périodes anciennes. C'est au travers des études de cas, de recherches ciblées et de la création d'un réseau d'experts que nous progressons dans notre connaissance de ce matériau et de sa conservation-restauration. Les travaux réalisés dans ce domaine font référence, tel le travail sur la caractérisation et la typologie des plombs de vitraux (maîtrise en conservation-restauration de Laurence Cuzange en 1999).

Composition du plomb de couverture et de décor

L'étude de la composition élémentaire du plomb employé pour l'élaboration des tables de couverture a débuté avec l'adaptation de la méthode d'analyse par LIBS (Spectroscopie d'émission optique sur plasma induit par laser) et surtout la campagne d'analyse des tables de plomb du chœur de la cathédrale de Beauvais au moment du chantier de restauration. En plus d'optimiser les paramètres d'analyse LIBS, ces examens ont produit une grande quantité de données qui ont impliqué l'utilisation de diverses techniques de traitement (système d'information géographique (SIG) pour la réalisation des cartographies de concentration, analyse en composante principale (ACP)).

En outre, dans l'objectif de continuer la comparaison entre différentes techniques d'analyses employées aujourd'hui, aussi bien du point de vue de la sensibilité que de la facilité de mise en œuvre, ces résultats d'analyses avaient été comparés à ceux obtenus en spectrométrie LA- ICP-MS effectués en parallèle sur les mêmes échantillons par l'IRAMAT d'Orléans - UMR 5060.

Nous poursuivons ce travail par l'analyse de ces plombs par d'autres techniques telles que la fluorescence X et le PIXE (Accélérateur AGLAE) et nous alimentons une base de données en réalisant ces analyses sur des plombs de provenances diverses comme des plaques décoratives de faîtage, des épis.

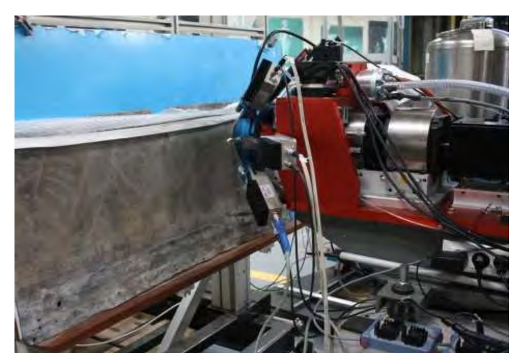


Figure 74 : analyses non destructive sur une bavette de faîtage par fluorescence X et PIXE avec AGLAE au C2RMF.

Personnel permanent : Annick Texier, Aurélia Azema

Doctorant : Delphine Syvilay

CDD : Delphine Syvilay

Documents associés :

Rapport :

Detalle V., Loisel C., Texier A., Syvilay D., Marie-Victoire É., Duchêne S., Bouichou M., Giovannacci D. *[et al.]*. 2013. Développement de méthodologies analytiques des matériaux du patrimoine par LIBS (MAPALIBS) = Development of LIBS analytical methodologies for cultural heritage materials characterization: poster. *In :* Max-Colinart S., coord. *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 20 et 21 novembre 2012*, Paris, ministère de la Culture et de la Communication, p. 106.

Publications :

Syvilay D., Texier A., Arles A. [...] Detalle V. *[et al.]*. 2013. Trace elements quantification of lead-based roof sheets of an historical monument. *In*: *7th Euro mediterranean symposium on laser induced breakdown spectroscopy*, *Bari, Italy, 16-20 September 2013*. Actes à paraître.

Communications :

Syvilay D., Texier A., Arles A., Gratuze B., Duchêne S., Detalle V. 2013. Detection of trace elements in leads-based historical materials by LIBS. *In*: *International symposium Fundamentals of laser-assisted micro- and nanotechnologies, FLAMN-13, Saint-Pétersbourg, Russia, June 24-28 2013*.

Syvilay D., Texier A., Arles A., Gratuze B., Duchêne S., Detalle V. 2013. Détection et quantification d'éléments traces dans des matériaux du patrimoine à base de plomb. *In*: *Journées LIBS, Lyon, 5 et 6 juin 2013*.

Syvilay D., Texier A., Arles A. [...] Detalle V. *[et al.]*. 2013. Trace elements quantification of lead-based roof sheets of an historical monument. *In*: *7th Euro mediterranean symposium on laser induced breakdown spectroscopy*, *Bari, Italy, 16-20 September 2013*. Actes à paraître.

Texier A., Zymla A. 2008. L'alliage du cuivre et du plomb pour fabriquer les moules à plombs. *In* : Lautier C., Sandron D., dir. *Antoine de Pise : l'art du vitrail vers 1400*. Paris, Comité des travaux historiques et scientifiques, p. 179-188.

Texier A., Zymla A., Loisel C. *[et al.]* 2008. Les plombs de vitraux d'après le traité d'Antoine de Pise, maître verrier du Trecento *In* : Lautier C., Sandron D., dir. *Antoine de Pise : l'art du vitrail vers 1400*. Paris, Comité des travaux historiques et scientifiques, p. 211-228.

Financement : contrat LRMH et thèse LRMH/SATIE Université de Cergy-Pontoise. (voir p. 124)

Montant :

Processus de fabrication des tables de plomb de couvertures et des éléments de décors de couverture

Durée : 2013 - 2014

A) Tables de plomb

Le chantier de restauration de la toiture du chœur de la cathédrale de Beauvais, ainsi que l'étude archéométrique liée (mesure des tables, des systèmes de fixation en liaison avec une étude dendrochronologique de la charpente et des voligeages) ont favorisé la campagne d'examen et de prélèvements menée par le LRMH. Les premières observations confrontées aux documents d'archives laissaient supposer que nous étions en présence de plaques datant de plusieurs périodes : XVIe, XVIIIe, XIXe et XXe siècles. Deux techniques de fabrication des tables sont possibles : coulées ou laminées. Par les examens de coupes métallographiques et les analyses des métaux, il s'agit d'apporter des éléments de compréhension quant à l'histoire technologique des couvertures de plomb mais aussi d'évaluer l'impact d'une exposition multiséculaire en extérieur sur la structure du métal ainsi que les effets du fluage potentiel, afin d'améliorer la durabilité des opérations de restauration. Une première étude de faisabilité avait été réalisée entre 2012 et 2013 ; les résultats obtenus nécessitaient un approfondissement. Une deuxième étude a eu lieu au cours de l'année 2014 : sur la base d'examens métallographiques ; cette étude a fourni des éléments permettant de différencier *a priori* quatre types de mise en forme (plaque coulée, coulée et écrouie partiellement, coulée et écrouie totalement, et laminée) (Fig. 75). Ces conclusions, en plus des résultats issus des analyses élémentaires de ces tables, sont à confronter avec les datations supposées de leur mise en place sur la couverture de la cathédrale de Beauvais.



Plaque de coulée

Plaque de plomb coulée avec écrouissage de surface limité



Plaque de plomb coulé avec écrouissage important et régulier



Plaque de plomb laminée

Figure 75 : les 4 types de structure métallographique observables sur les tables de couverture en plomb de la cathédrale de Beauvais. ©A. Zymla.

Collaboration : Anna Zymla, métallurgiste, enseignante retraitée de l'École Centrale de Paris

Personnel permanent : Annick Texier, Aurélia Azema

Financement : contrat LRMH

Montant : 25 000 €

B) Épis de faîtage

Les épis de faîtage font partie des éléments de toiture (ayant pour fonction d'étanchéifier la charpente en recouvrant la partie saillante) et peuvent avoir été élaborés en différents métaux dont le plomb. Le LRMH a réalisé l'étude de deux pièces faisant partie de l'ornement d'un épi de faîtage de la toiture d'un hôtel particulier de Romorantin et daté du XVIe siècle (aujourd'hui conservé au musée de Sologne, (Fig. 76) : le sommet aux feuilles d'acanthe et la salamandre ailée. En mettant en œuvre des examens à plusieurs échelles (observations visuelles, analyses par fluorescence X et par diffraction des rayons X), nous avons pu caractériser les grandes étapes de leur fabrication ainsi que les techniques de mise en forme et de finition. L'élaboration de l'épi allie en effet l'emploi du plomb repoussé et du plomb moulé. En outre nous avons pu mettre en évidence l'application ancienne d'une polychromie : dorure probablement à la feuille sur préparation rouge (cinabre) et étamage du corps de la salamandre sans pouvoir préciser avec certitude si l'étamage était total ou partiel.

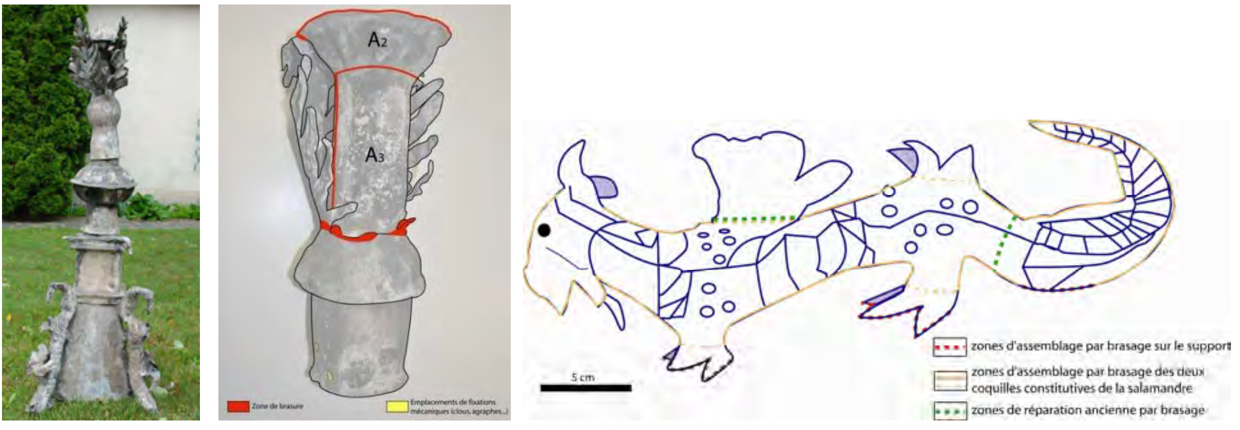


Figure 76 : relevés technologiques sur les éléments d'un épi de faîtage du XVIe siècle conservé au musée de Sologne, Romorantin.

Polychromie des plombs de couverture

Durée : pluriannuelle

Dès le XIIIe siècle, et ce jusqu'au XVIe siècle, les toitures métalliques (en plomb ou en cuivre essentiellement) des édifices prestigieux (cathédrales, abbayes, châteaux,...) semblent avoir souvent été décorées. Mais compte tenu de la fragilité de ces supports et de leur exposition directe aux variations climatiques, peu de décors, et toujours fort mal conservés, nous sont parvenus. En outre, que ce soit de par les témoignages écrits ou bien *via* la conduite d'études scientifiques, les valeurs chromatiques et les composants de ces polychromies demeurent approximatives. En effet, les couleurs encore visibles aujourd'hui ne sont pas celles d'origine mais celles résultant des altérations. C'est dans ce cadre que le LRMH conduit une recherche afin de contribuer à une meilleure connaissance des techniques et matériaux d'élaboration de ces décors.

La portée d'une telle recherche est double : elles sont d'une part en ce qui concerne les monuments ornés de ces bavettes de faîtage en eux-mêmes de préciser la nature et la valeur chromatique de ces décors et d'autre part, de sensibiliser sur le témoignage rare et précieux qu'ils constituent. Ces informations permettront de développer des méthodes de conservation-restauration adaptées.

Une série d'examens non invasifs a été mise en œuvre sur des bavettes de faîtage appartenant aux toitures des châteaux d'Azay-le-Rideau (Fig. 77) et de Châteaudun (Fluorescence X, PIXE et RBS sur l'accélérateur de particule AGLAE du C2RMF). De nombreuses réponses ont pu être apportées comme par exemple l'élaboration de décors à base d'un mélange plomb-étain. Cependant, certaines polychromies, pourtant visibles à l'œil nu, demeurent incertaines en ce qui concerne la nature du matériau employé. Ces premières analyses ne nous permettent d'avancer que des hypothèses que nous nous attachons à préciser en employant d'autres techniques d'examens, parfois destructifs (en cours).







Figure 77 : bavette de faîtage du château d'Azay-le-Rideau analysée par PIXE et RBS sur AGLAE.

Altération des plombs de couverture

Durée : 2013- 2015

L'altération des plombs de toiture est indéniable. Pourtant, si le phénomène de corrosion atmosphérique du plomb en plomb II de couleur gris-blanc est déjà connu, certaines pièces comportent une altération brun-rouge dont l'étendue augmente au fil du temps (Fig. 78). Sa composition n'est pas encore clairement définie et l'origine de sa formation est indéterminée. Ces deux faciès de corrosion ne semblent pas directement liés à l'orientation (par exemple ensoleillement et exposition à la pluie différents en fonction de la position sur le monument), ni à la structure métallographie ou ni aux temps d'exposition des tables de plomb. Comprendre le phénomène à l'origine de l'espèce brun-rouge devrait permettre de développer une méthodologie de nettoyage des plaques atteintes et de limiter son étendue.

En partenariat avec le Laboratoire des interfaces et systèmes électrochimiques de l'université Pierre et Marie Curie, l'étude de cette altération particulière du plomb se poursuit et se précise. En 2014, un stage portant sur l'étude des couches de corrosion des plombs de couverture de la cathédrale de Beauvais par microscopie Raman a été effectué par Clément Mallet (INP Grenoble-Phelma) sous la direction de Suzanne Joiret. Les examens réalisés ont permis d'établir une stratigraphie de l'altération brun rouge, depuis le métal sain (plomb) vers l'extérieur (Fig. 79 et 80). Contrairement aux résultats de l'altération grise, la présence du composé soufré a été remarquée dans l'altération brun-rouge. En outre, une organisation particulière du plomb IV semble être associée à la couleur rouge-brun observée. Il a également été remarqué que la propagation de l'altération rouge semble se produire s'il existe un couplage galvanique entre une plaque atteinte et une plaque saine, mais cette observation nécessite d'apporter des examens complémentaires pour pouvoir être confirmée. Enfin, le mécanisme exact de formation du plomb IV devrait pourvoir être détaillé lors d'analyses approfondies.

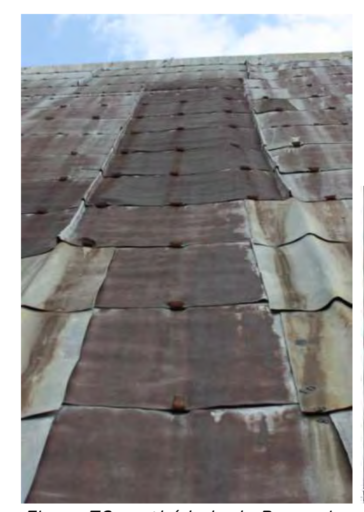


Figure 78 : cathédrale de Beauvais, tables de plomb présentant des corrosions brun rouge.

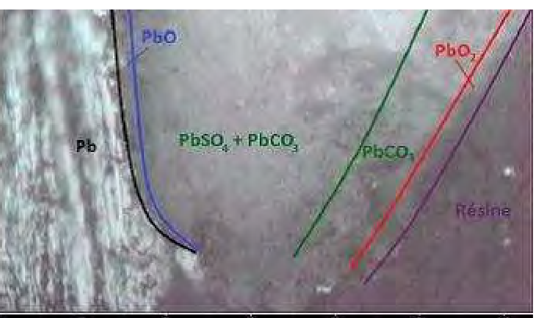


Figure 79 : stratigraphie des différentes espèces chimiques observées sur un échantillon de corrosion brun-©Clément Mallet.

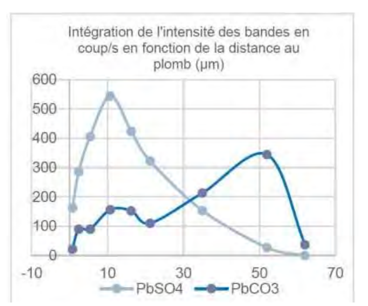


Figure 80 : schéma de répartition des composés.

Collaboration : Laboratoire des interfaces et systèmes électrochimiques de l'université Pierre et Marie Curie (S Joiret).

Personnel permanent : Annick Texier, Aurélia Azéma.

Financement : contrat LRMH.

Montant : 10 000 €.

Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti : méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale

Durée : octobre 2010 – juin 2014

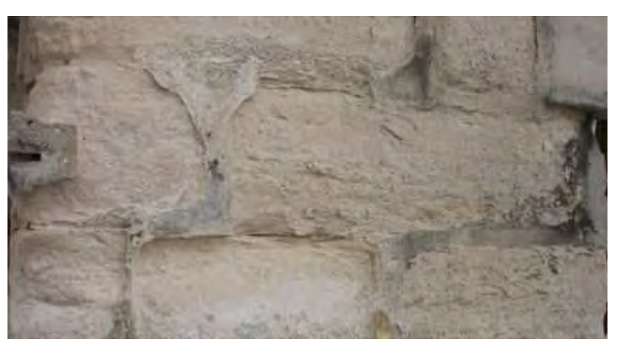


Figure 81 : altération par les sels sur l'église Saint Spire – Corbeil-Essonne (91).

L'altération par les sels est considérée comme un important mécanisme de dégradation des roches dans des environnements variés (régions polaires, désertiques, côtières) terrestres et extra-terrestres (Mars en particulier). Cette altération est également reconnue comme une cause majeure d'endommagement de nombreux matériaux du patrimoine bâti comme les pierres, mais aussi les briques ou les bétons. Les sulfates de sodium, provenant en grande partie des pluies acides et de la pollution atmosphérique, sont admis comme étant les sels les plus destructifs pour ces matériaux. C'est ainsi qu'ils sont couramment utilisés dans les études expérimentales sur l'altération des roches naturelles ainsi que dans les tests de durabilité des matériaux. Malgré leur utilisation généralisée, le rôle de ces sels demeure mal connu en raison des nombreuses phases que présente le système Na_2SO_4-H_2O (eau + sel). De plus, l'altération des matériaux poreux par les sulfates de sodium ne résulte pas préférentiellement d'une phase mais plutôt de successions de transition de phases ou chemins de cristallisation. Leur étude est par conséquent très importante pour comprendre les processus de cristallisation de ces sels dans les réseaux poreux.

En conditions environnementales « normales », les sulfates de sodium comprennent 2 phases stables :

- une phase anhydre (sans eau - la thénardite Na_2SO_4)
- une phase décahydratée (avec 10 molécules d'H_2O - la mirabilite Na_2SO_4- $10H_2O$).

Une phase hydratée métastable (qui n'est pas stable en théorie, mais qui paraît telle en raison d'une vitesse de transformation lente) est très souvent observée lors d'un refroidissement d'un matériau saturé d'une solution de sulfate de sodium : c'est la phase heptahydrate (avec 7 molécules d'H_2O : Na_2SO_4-$7H_2O$).

Les différents développements expérimentaux mis en œuvre au cours de cette thèse ont permis d'identifier et de caractériser les signatures thermiques associées aux différentes phases hydratées de sulfates de sodium, pour ainsi observer leur impact sur le milieu poreux des pierres. On a pu constater que seule la mirabilite pouvait cristalliser à l'intérieur des pierres dans nos conditions expérimentales et que cette phase pouvait induire des endommagements beaucoup plus importants que la thénardite.

Collaboration : Laboratoire Géosciences et Environnement GEC – Université de Cergy-Pontoise (Ronan Hébert, directeur de thèse).

Personnel permanent : Ann Bourgès.

Doctorant : Mélanie Denecker.

Article : Denecker M.F.C., Hebert R.L., Wassermann J., Dosseh G., Menendez B., Bourgès A. 2014. Experimental study of the crystallization of sodium sulfate hydrates through temperature monitoring. *Environmental earth sciences*, DOI 10.1007/s12665-014-3379-2.

Communication orale avec actes : Denecker M., Hébert R., Bourgès A., Menendez B., Doehne E. 2012. Mirabilite and heptahydrate characterization from infrared microscopy and thermal data. *In : 12th International congress on the deterioration and conservation of stone, New York, 22-26 October 2012.*

Denecker M., Menéndez B., Esteban L., Hebert R., Bourgès A. 2011. Modification of the physical properties of rocks due to salt crystallization : [poster résumé]. *In* : Ioannou I., Theodoridou M., ed. *Salt weathering on buildings and stone sculptures : SWBSS, Limassol ,Cyprus, 19-22 October 2011*, p. 411.

Financement : LabEx Patrima.

Montant : 105 000 €

Les ciments naturels : histoire, identification et caractérisation »

Durée : 2009 – 2013

Depuis 2002 et une première étude du CPP sur les bétons anciens du XIX[e] siècle de la région Rhône-Alpes, le pôle Béton du LRMH mène des programmes de recherche sur les ciments naturels. Ainsi, une étude bibliographique et documentaire a montré que l'industrie de ces ciments s'est développée sur l'ensemble du territoire français dès le XIX[e] siècle. Une importante production se mit alors en place, avec une exportation à l'échelle mondiale (Amérique du Sud, Afrique du Nord). Des centaines d'édifices furent construits grâce à ce matériau en France et en Europe. Cependant ces ciments restent méconnus. Pierres factices en région Rhône-Alpes, enduit-ciment à Marseille, nos projets ont mis au jour de nombreuses applications de ces ciments et ont apporté de précieuses informations historiques et techniques. Un protocole analytique d'identification et de caractérisation a été mis au point et optimisé. Une base de données (typologie de grains, morphologie et composition des phases hydratées, DRX…) est en construction et nous permet d'identifier les ciments naturels, en les distinguant clairement des chaux hydrauliques et des ciments Portland artificiels, mais aussi suivant leurs origines (Région de Marseille, Rhône-Alpes, Angleterre, Autriche…). L'objectif à présent est d'explorer d'autres régions cimentières au XIX[e] en France par la caractérisation des ciments du nord de la France (Boulogne-sur-Mer…), d'Île-de-France et de compléter les résultats obtenus sur la Bourgogne en termes de fabrication, de composition et d'application patrimoniale.

Dans ce bilan scientifique, une étude de cas à la frontière entre service et recherche sera présentée, puis les résultats du dernier projet du CPP dédié au patrimoine en ciment naturel de la région de Marseille seront résumés.

Cathédrale Saint-Pierre/Saint-Paul, TROYES, Aube (10). Portail occidental, mortier du XIX[e] siècle : bilan sanitaire, caractérisation et aide à la restauration

Deux études ont été réalisées sur les portails occidentaux des **cathédrales d'Angers et de Troyes** (Fig. 82 et 83), concernant une importante application des ciments naturels au XIX[e] siècle qui est la restauration de sculptures en pierre.

➢ Sur la façade occidentale de la **cathédrale de Troyes**, des mortiers ocres ont été observés, ayant permis la restauration au XIX[e] siècle de certains éléments en pierre. Différentes utilisations de ces mortiers ont été notées : mortier de réparation, de rejointoiement, de remplacement de parties ou en totalité de sculpture ou modénature. Suivant ces utilisations, leur mise en œuvre varie : mortier riche ou pauvre en liant, sans armature ou avec armatures en os ou fer (carrés ou fils). Certains détails, comme les traces d'outils, montrent que ces mortiers ont été appliqués *in situ*, directement sur la pierre, c'est-à-dire sans préfabrication.

Les mortiers de restauration utilisés sur le portail occidental de la cathédrale de Troyes sont des mortiers de **ciment naturel, ou romain**. En effet, la présence de gehlénite et de silico-aluminates de calcium hydratés (phase CASH) comme matrice dans tous les échantillons, l'absence de portlandite et la forte présence d'ettringite en zone non carbonatée indiquent clairement que le liant utilisé pour fabriquer ces mortiers est un **ciment naturel**, riche en sulfates et en aluminates, et dont la cuisson est inférieure à 1100 °C. Le ciment a été soit utilisé pur, c'est à dire sans granulat, soit en mortier avec ajout de sable siliceux (quartz). En zone carbonatée, la pâte cimentaire est constituée d'une matrice de carbonates de calcium



Figure 82 : portail occidental de la cathédrale d'Angers. Restaurations en pâte de ciment naturel.



Figure 83 : portail occidental de la cathédrale de Troyes. Reconstitution de décor en pâte de ciment naturel armée.

(calcite, vatérite, aragonite et amorphes), de gypse et de phase CASH. En zone non carbonatée celle-ci est aussi composée de phase CASH et est riche en soufre et en magnésium. Dans les porosités en zone non carbonatée, de nombreuses cristallisations d'ettringite, de sels de Friedel et d'aluminates de calcium sont observées (Fig. 84). De nombreux grains anhydres résiduels sont présents dans les mortiers. Ces éléments résiduels sont de plusieurs sortes : pyrite plus ou moins oxydée ; grains de clinkers bien cristallisés avec de nombreuses solutions solides de phases aluminates (gehlenite, C3A, C4AF) et des C2S ; et grains de clinker plus faiblement cristallisés. Ces grains de clinker sont parfois partiellement ou totalement carbonatés (Fig. 85).

Sur cet édifice, la dégradation de ces mortiers varie suivant leur utilisation et mise en œuvre. Les mortiers de ré-agréage ou de rejointoiement montrent peu de pathologies, alors que les mortiers associés aux armatures métalliques montrent d'importantes dégradations, qui vont d'une fissuration légère à l'épaufrure jusqu'à la disparition totale du mortier autour de l'armature. Ces épaufrures sont engendrées par la corrosion des armatures métalliques. Cette corrosion est causée principalement par la carbonatation des mortiers, qui par la formation de carbonates de calcium, entraîne la diminution du pH au contact des armatures, et donc la dépassivation de la couche protectrice du métal. La carbonatation entraine aussi la transformation des phases hydratées originelles du mortier en différents carbonates de calcium, gypse et gels de silice. Les silicates de calcium anhydres résiduels subissent un processus de décalcification, alors que d'autres phases anhydres telles que la gehlénite ou la brownmillerite ne sont pas touchées. En termes de protocole de restauration, il a été conseillé, dans la mesure du possible, dans les zones fissurées, de décaper les armatures visibles ou de les remplacer par des armatures inox, et de procéder à des reprises à base de mortier de ciment prompt, liant le plus proche chimiquement de celui rencontré sur les cathédrales. Il est cependant clair que le problème de la carbonatation des mortiers anciens n'est pas réglé avec cette technique et que si de l'eau parvenait en quantité suffisante jusqu'aux armatures enrobées de mortier carbonaté, la corrosion reprendrait. Une première option expérimentale serait d'appliquer un inhibiteur de corrosion qui permet de réparer la couche protectrice altérée du métal. Une deuxième option expérimentale aurait consisté à appliquer un hydrofuge de surface afin de limiter la pénétration d'eau sous forme liquide et par conséquent, potentiellement ralentir la corrosion. Cependant, ces deux techniques nécessitent des essais de compatibilité complémentaires, les mortiers de ciment naturel contenant des teneurs non négligeables en sulfates.

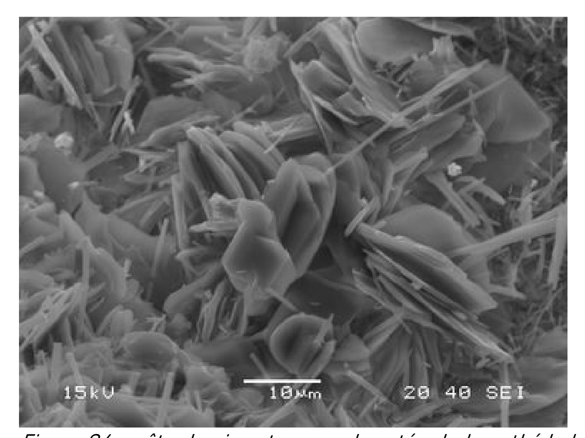


Figure 84 : pâte de ciment non carbonatée de la cathédrale de Troyes, plaquettes d'aluminates de calcium et aiguilles d'ettringite. Vue MEB en électrons secondaires sur fracture (G=x1800).

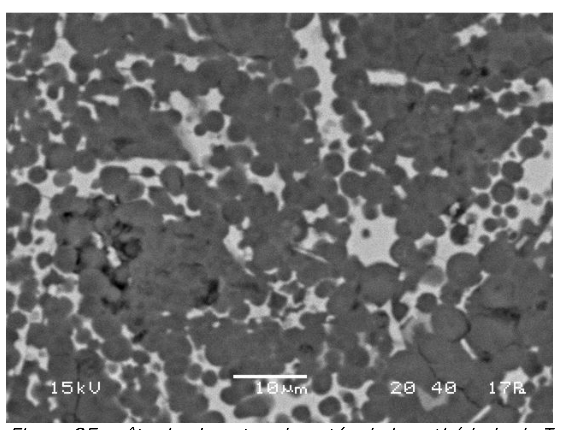


Figure 85 : pâte de ciment carbonatée de la cathédrale de Troyes, C2S décalcifiés et phase liante monophasée. Vue au MEB en électrons rétrodiffusés sur section polie (G=x1700).

Personnel permanent : Myriam Bouichou, Élisabeth Marie-Victoire.

Communication orale avec actes :
Bouichou M., Marie-Victoire É., Texier A., Blondiaux T. 2013. How to identify a natural cement: case study of Vassy church, France. *In* : Hugues J.J., ed. *HMC 13: The 3rd historic mortars conference, Glasgow, Scotland, University of the West of Scotland, 11-14 September 2013*, 8 p.

Financement : interne.

Les façades en enduit-ciment à Marseille



Durée : septembre 2009 - avril 2013

Les façades en « enduit-ciment » à Marseille sont nombreuses et se sont développées en même temps que l'industrie cimentière dans la région de Marseille, à partir du milieu du XIXe siècle. Ces enduits de couleur ocre sont souvent confondus avec des enduits à la chaux. Un programme de recherche a donc été élaboré pour caractériser ces matériaux méconnus. Ce projet a consisté tout d'abord en une étude historique des ciments naturels à Marseille. De riches informations ont été récoltées que ce soit sur le mode de fabrication de ces ciments, sur leur diversité, et sur leur mode original de distribution (Fig. 86). En effet, l'étude a révélé qu'une même compagnie détenait les usines de production et les entreprises de mise en œuvre, avec des modèles choisis sur catalogue puis exécutés par leurs ouvriers spécialisés (Fig. 87).

Dans une seconde étape, une enquête de terrain sur ces « enduits-ciment » a été effectuée, indiquant une multitude d'applications des ciments naturels : enduit, moulage, tirage au gabarit, effet poli, granulats apparents… Des pathologies courantes pour des façades enduites (fissurations, décollements d'enduits…) ont également été constatées.

La troisième étape a permis de caractériser les mortiers et les différents liants rencontrés de sites tests sélectionnés à l'issue de l'enquête de terrain. Un protocole expérimental spécifique a été développé, incluant notamment l'observation de sections polies et de fractures à différentes échelles (loupe binoculaire, microscope optique et microscope électronique à balayage couplé à une sonde EDS), mais aussi des analyses en diffraction des rayons X. Les résultats de cette étude ont permis de confirmer que les liants utilisés à Marseille au XIXe étaient bien des ciments naturels. Les analyses ont également confirmé les apports de l'étude historique, en montrant que des ciments de nature différente, en termes de caractéristiques cristallographiques et chimiques, étaient utilisés suivant l'application architecturale choisie (Fig. 88 et 89).

La dernière étape du projet a consisté à étudier la compatibilité chimique de mortiers de ciment naturel actuel avec les mortiers anciens marseillais et avec les maçonneries « support ». Des analyses en chromatographie ionique des sels solubles à l'eau ont permis de quantifier les composés mobilisables de différentes formules de mortiers à base de différents liants et des mortiers anciens des sites sélectionnés.



Figure 86 : étiquettes des différents ciments fabriqués par la société des ciments Désiré Michel.



Figure 87 : bâtiments de la consigne sanitaire sur le Vieux-Port à Marseille. À gauche : bâtiment en pierre. À droite : son fac similé en mortier de ciment naturel construit par la société Désiré Michel en 1858.

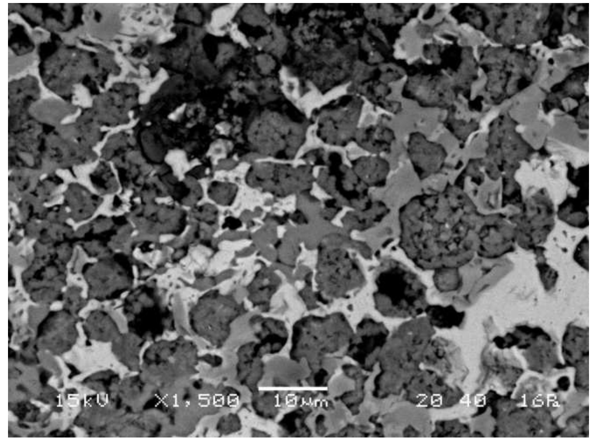


Figure 89 : chapelle du Calvaire à Marseille. Silicates de calcium dans une matrice biphasée observés sur un échantillon de modénature. Vue MEB en électrons rétrodiffusés (G=x1500).

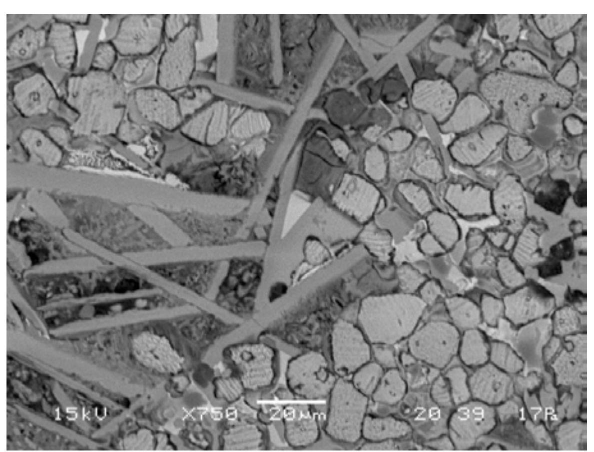


Figure 88 : chapelle du Calvaire à Marseille. Cristaux de C2S présentant des stries parallèles sur un échantillon d'enduit. Vue MEB en électrons rétrodiffusés (G=x750).

Collaboration : Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine (CICRP, Marseille).

Personnel permanent : Myriam Bouichou, Élisabeth Marie-Victoire.

CDD : Claire Valageas, Estel Colas.

Communications orales avec actes :
Valageas C., Bouichou M., Marie-Victoire É. *[et al.]*. 2013. History of the natural cement industry in Marseille region, France. *In* : Hugues J.J., ed. *HMC 13: The 3rd historic mortars conference, Glasgow, University of the West of Scotland, 11-14 September 2013*, Glasgow,University of the West of Scotland, 9 p.

Valageas C., Bouichou M., Marie-Victoire É. *[et al.]*. 2013. Histoire de l'industrie du ciment naturel dans la région de Marseille. *In* : *RIPAM 5 : 5e rencontres internationales du patrimoine architectural méditerranéen*, *Marseille,16-18 octobre 2013,* Marseille, CICRP, p. 162-166.

Financement : Cercle des partenaires du patrimoine, mécénat industriel Vicat.

Montant : 105 000 €.

Opération archéologique : prospection avec relevé d'art rupestre - Grotte de Comarque (Les Eyzies de Tayac – Sireuil, Dordogne)

Durée : 27 octobre 2014- 8 novembre 2014

Ce projet d'opération archéologique (dirigé par Oscar Fuentes de l'UMR 7041 Ethnologie préhistorique et Camille Bourdier de l'UMR 5608 Traces) intègre une recherche pluridisciplinaire : étude de l'art pariétal, taphonomie des parois ornées, archéologie des parois ornées, mobilier archéologique, et surveillance bioclimatique. C'est dans ce dernier volet que les pôles Grottes ornées et Microbiologie du LRMH interviennent.

Il est reconnu qu'une stabilité climatique et biologique d'une cavité est garante de sa bonne conservation. De ce fait, différents paramètres climatiques et microbiologiques doivent être contrôlés régulièrement mais ce contrôle peut être intensifié lorsqu'une présence humaine existe. Cette présence humaine peut se caractériser soit par des visites touristiques soit par des études archéologiques nécessitant du temps de présence dans la cavité. Ainsi, un état climatique et microbiologique initial a été acquis lors d'une période sans visite. Les paramètres climatiques enregistrés sur station sont la température de l'air et de la roche ainsi que l'humidité relative de l'air et le taux de CO_2 atmosphérique. Ces paramètres sont fondamentaux pour établir le risque de condensation ou d'assèchement des parois et des sols pouvant engendrer des pertes de l'information archéologique par des phénomènes de corrosion ou de concrétion. Cet état initial permettra de déterminer le « bruit de fond climatique » de la grotte. L'équipement a été fourni par le LRMH. Un contrôle d'aérobiocontamination est également nécessaire afin de quantifier d'une part les germes bactériens, fongiques et alguaires et d'autre part d'identifier les espèces présentes dans l'air du site en régime naturel. Ces différentes espèces seront identifiées via leurs spores collectées lors des prélèvements d'air. Le suivi climatique s'est poursuivi au cours de l'étude archéologique. Les données seront exploitées de manière journalière afin de pouvoir vérifier le retour au bruit de fond au cours de la nuit et de préconiser d'éventuelles « pauses » dans les jours de présence humaine. Le contrôle des aérosols biologiques a été de nouveau réalisé au cours de la campagne archéologique puis à la fin de cette campagne pour déterminer la quantité de germes apportée par la présence humaine et de vérifier la capacité d'auto-épuration de la cavité. Ce suivi sanitaire a été accompagné d'un cahier de contrôle de la présence humaine sur le site.



Figure 90 : cheval sculpté. Grotte de Comarque (24, Dordogne).

Collaboration : UMR 7041, (Oscar Fuentes), UMR 5608 (Camille Bourdier), Laboratoire PACEA (Bordeaux), INRAP, CNRS.

Personnel permanent : Stéphanie Touron, Faisl Bousta, Alexandre François, Johann Leplat, Dominique Bouchardon.

Financement : interne au LRMH.

Origine des dépôts minéraux dans les cavités ornées : apport des isotopes stables et de la chimie des eaux

Durée : août 2012 - août 2014

Les recouvrements minéraux (gypse et carbonates principalement) sont fréquents dans les grottes ornées et peuvent parfois gêner la lecture des œuvres et également les fragiliser (perte de matériel suite aux cristallisations de sels, formation d'écailles…). L'identification de l'origine de ces dépôts se heurte à la variabilité des sources : intrinsèque à la roche, atmosphérique, eaux de percolation, produits de l'agriculture. Grâce à l'isotopie de l'oxygène, du soufre, du carbone et de l'azote sur les minéraux de sulfate ainsi qu'à la composition des eaux percolantes, l'origine et la source des recouvrements peuvent être déterminées et mettre en évidence l'existence d'un ou plusieurs réservoirs.

Les résultats de cette étude ont montré une contribution de plusieurs sources pour l'oxygène des échantillons, les valeurs de $\delta^{18}O_{OTotal}$ ne peuvent pas être discutées car les échantillons n'étaient jamais une phase pure de gypse (présence de calcite, d'argile et de la matière organique).

La précipitation du gypse en paroi des grottes mobilise soit du soufre contenu dans l'atmosphère, soit du soufre remobilisé à partir de la roche encaissante et reprécipité. Les données isotopiques varient entre 4,6 et 9,6 ‰/CDT, ces valeurs sont inférieures à celles attendues pour le soufre du gypse de l'époque Crétacé (période de mise en place des formations calcaires de la zone d'étude) qui est donnée dans la littérature entre 14 et 17 ‰/CDT et supérieures à celles données pour le soufre atmosphérique (autour de 3 ‰/CDT). Deux sources pour l'apport de soufre dans les dépôts de gypse peuvent être envisagées : un soufre issu de la dissolution du gypse contenu dans la roche et un soufre provenant de l'atmosphère.

Les teneurs en carbone et soufre montrent qu'aucun des échantillons fournis n'est du gypse pur. Les teneurs en gypse recalculées varient entre 1 et 65 %. La signature isotopique des roches carbonatées du secteur d'étude est donnée avec un $\delta^{13}C_{CTotal}$ proche de 0 ‰. La signature isotopique du carbone issu de la matière organique est donnée avec des $\delta^{13}C_{CTotal}$ très négatifs. Tous les échantillons présentant des teneurs en gypse élevées (45 % et plus) sont également riches en matière organique. L'hypothèse d'un mélange de dépôts de sels et de développements microbiens est donc à étudier.



Figure 91 : résurgence de l'abri Reverdit (Sergeac, 24, Dordogne).

Collaboration : Université Jean Monnet (Saint-Étienne) - Département de géologie-pétrologie-géochimie - CNRS-UMR 6524 « Magmas et Volcans », (Véronique Lavastre).

Personnel permanent : Stéphanie Touron.

Financement : subvention LRMH.

Montant : 11 000 €.

PANTEROSE : Pierre ANormalement Tachée d'Eléments ROSES

Durée : septembre 2014 – septembre 2019

En charge de l'accompagnement scientifique dans le cadre du conseil scientifique et technique de l'État (CST), le Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH) a constaté à plusieurs reprises la présence de colorations roses sur certains édifices du patrimoine architectural bâti.

Cette coloration superficielle, d'épaisseur micrométrique et constituée d'éléments solubles à l'eau, s'observe principalement sur des pierres calcaires et des mortiers situés à l'abri des intempéries.



Figure 92 : Château de Sully sur Loire (Loiret, 45).

Le château de Sully-sur-Loire (FIG. 93) subit ainsi depuis plusieurs années ce désagrément esthétique. Ce phénomène semble lent et peu évolutif dans le temps.

Le LRMH a programmé une étude afin d'identifier la nature, l'origine et les conditions propices à l'apparition, au développement puis à la persistance de cette coloration rose. Enfin il faudra trouver une solution pérenne, curative ou préventive à son éradication.

Une instrumentation dans l'escalier d'honneur du château de Sully-sur-Loire (FIG. 92) a été installée afin de caractériser le microclimat local au voisinage immédiat des surfaces incriminées. Deux fois par an, en période chaude et en période froide, un suivi photographique et colorimétrique permettra de contrôler l'évolution des propriétés des surfaces, et de tester l'impact de la lumière.



Figure 93 : contre-marches de l'escalier d'honneur.

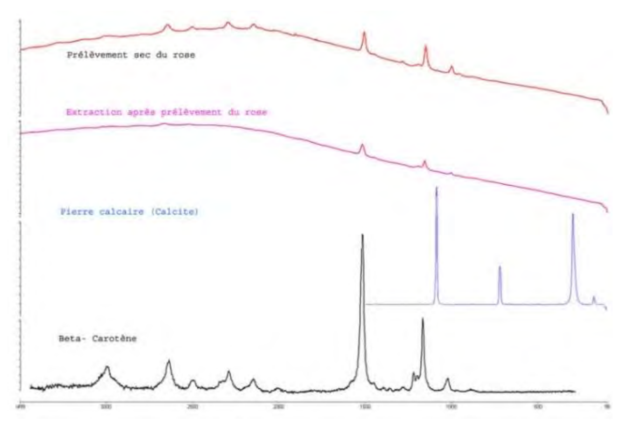


Figure 94 : spectre Raman des prélèvements roses comparé à ceux du beta-carotène et de la pierre calcaire.

.

Personnel permanent : Didier BRISSAUD, Alexandre FRANÇOIS, Johann LEPLAT, Dominique BOUCHARDON, Jean-Didier MERTZ.

Financement : interne au LRMH.

Rôle des éléments de transition (Co, Cu) dans la coloration des verres. Application aux vitraux du Moyen Âge

Durée : octobre 2011- octobre 2014

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude des relations entre structure et propriétés des verres. La coloration des verres par les métaux de transition en est une des plus belles illustrations et sa compréhension constitue une étape fondamentale de l'étude des vitraux du Moyen Âge. L'opportunité unique de la dépose des vitraux du XIIIe siècle de la Sainte-Chapelle de Paris a permis d'appliquer la démarche multidisciplinaire développée dans cette thèse pour comprendre la coloration des verres. En s'intéressant au cas des verres bleus colorés par Co^{2+}, ce travail a nécessité une démarche de spectroscopie fondamentale combinant des méthodes expérimentales (XANES et EXAFS au seuil K de cobalt et spectroscopie d'absorption optique) et théorique (calculs multiélectroniques dans l'approche en champ de ligand des préseuils K), pour mieux comprendre l'environnement local du Co^{2+} dans les verres ainsi que la signature spectroscopique de Co^{2+} dans des sites « exotiques ». L'influence des symétries locales (O_h, T_d, C_{4v} et D_{3h}) du site de Co^{2+} sur l'hybridation p-d et sa signature spectroscopique a été montrée grâce à des références cristallines. Les espèces penta-coordonnées ont été identifiées dans des verres modèles, nous permettant de proposer plusieurs modèles structuraux impliquant : ^{IV}Co, ^{V}Co et ^{VI}Co dans le cadre des verres de borate alcalin et ^{IV}Co et ^{V}Co pour les verres de silicate et contrôlés par les capacités de compensation de charge des cations du verre. Les deux principales nuances de bleu des verres du XIIIe siècle de la Sainte-Chapelle de Paris sont dues à Co^{2+} et Fe^{2+} tandis que le cuivre, également présent, est majoritairement monovalent, preuve des conditions réductrices de fabrication des verres de cette époque.



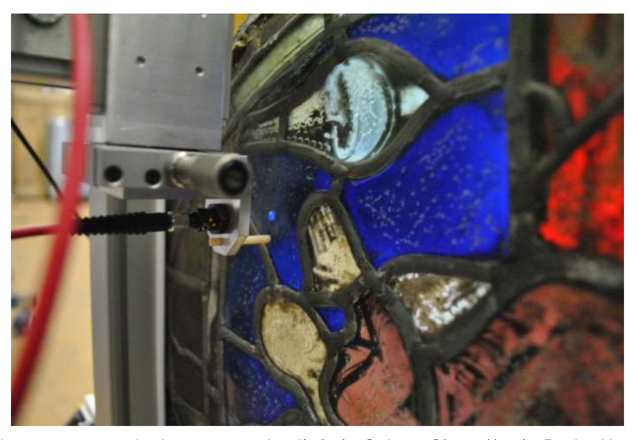


Figure 95 : réalisation d'analyses par spectroscopie d'absorption optique en transmission sur un vitrail de la Sainte-Chapelle de Paris. Un portique spécifique a été mis au point à l'IMPMC pour la réalisation de mesures directes sur panneaux de vitraux.

Collaboration : université Pierre et Marie Curie, Paris VI, École doctorale de physique et chimie des matériaux – ED 397, Institut de Minéralogie, de Physique de la Matière et de Cosmochimie – UMR 7590 (Georges CALAS, professeur, directeur de thèse).

Personnel permanent : Claudine LOISEL, Fanny BAUCHAU (pôle Vitrail).

Doctorant : Myrtille HUNAULT (université Pierre et Marie Curie).

Publications :

HUNAULT M., ROBERT J.-L., NEWVILLE M., GALOISY L., CALAS G., 2014. Spectroscopic properties of five-coordinated Co^{2+} in phosphates, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 117 : 406-412.
HUNAULT M., CALAS G, GALOISY L., LELONG G., NEWVILLE M., 2014. Local Ordering Around Tetrahedral Co^{2+} in Silicate Glasses, *Journal of the American Ceramic Society*, 97 (1) : 60-62.

Communication orale sans actes :

HUNAULT M., CALAS G., CORMIER L., GALOISY L., LELONG G, 2013. Spectroscopic studies of Co2+ in oxide glasses.
23rd International Congress on Glass, 1-5 juillet 2013, Prague (République tchèque)
HUNAULT M., CALAS G., GALOISY L, LELONG G., NEWVILLE M., 2013. Local ordering around divalent cobalt in silicate glasses.
Living Glass, 11-13 septembre 2013, Cambridge (Royaume-Uni)
HUNAULT M., CALAS G., JUHIN A., 2014. Color of Co2+ in alkali borate glasses: revisiting Paul & Douglas. *Joint Meeting DGG – GOMD, 25-30 mai 2014, Aachen (Allemagne)*
HUNAULT M., BAUCHAU F., LOISEL C. *[et al.]* 2014. Reducing manufacturing conditions of medieval blue glass revealed by µ-XANES: abstract. *In* : *Synchrotron radiation and neutrons in art and archaeology conference (SR2A-2014)*, *Paris, 9-12 septembre 2014*. Actes à paraître.
HUNAULT M., CALLAS G., GALOISY L., LOISEL C., BAUCHAU F., HÉROLD M. 2014. Mediaeval blue stained glasses: from spectroscopy to history. *Glassac14, Glass science in art and conservation*, *Durham, 10-12 septembre 2014*.

Financement : contrat doctoral - Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche.

Montant : 60 657€ (contrat doctoral).

Suivi *in situ* de la corrosion et des conditions d'humidité propices à la corrosion des armatures dans les bétons armés

La corrosion des armatures est aujourd'hui la première cause d'altération des bétons qu'il s'agisse d'ouvrages d'art, d'édifices industriels, d'immeubles d'habitation ou de monuments historiques (Fig. 96). Outre le coût considérable des réparations dans le domaine du patrimoine, la corrosion des armatures dans le béton induit des pertes irrémédiables de matière originale. La détection précoce de la corrosion, mais aussi le diagnostic *in situ* constituent donc des enjeux à la fois économiques et culturels.



Figure 96 : panel de monuments et œuvres en béton protégées au titre des monuments historiques. De gauche à droite : église Sainte-Thérèse à Aubergenville (78), cité Radieuse à Marseille (13), Puits Sainte-Marie à Ronchamp (70), église du Saint-Esprit à Paris (75), église Saint-Lazare à Lèves (28), église Sainte-Odile à Paris (75).

Différents appareils de terrain ont été développés, depuis le milieu du XXe siècle, dans le but de détecter *in situ* les phénomènes de corrosion des armatures dans les bétons. Les plus répandus sont fondés sur des mesures électrochimiques : potentiel, résistivité ou résistance de polarisation. Cependant, en 2007, le projet « Benchmark des poutres de la Rance » (2005-2007) avait révélé de grandes disparités dans les résultats obtenus avec différents appareils pour une même grandeur physique instrumentée. De 2007 à 2010 l'ANR a soutenu le projet APPLET (Durée de vie des ouvrages : approche prédictive, performantielle et probabiliste), qui avait pour objectif de comprendre ces disparités et de mieux évaluer l'impact des conditions environnementales sur les mesures réalisées *in situ*. En parallèle, le MCC avait subventionné un programme dédié à la corrélation entre mesures de terrain et produits de corrosion formés dans les bétons carbonatés (PNRCC).

L'ensemble de ces projets a permis de grandes avancées dans la fiabilité de l'instrumentation de la corrosion des armatures dans les bétons armés, montrant notamment la nécessité d'un suivi dans le temps, en corrélation avec l'évolution des conditions climatiques. Des capteurs à noyer dans le béton, permettant ce type de suivi ont plus récemment été mis au point, mais nécessitent des travaux de calibration et de corrélation avec les mesures habituellement réalisées sur le terrain.

Par ailleurs, les mesures électrochimiques de terrain étant particulièrement délicates à mettre en œuvre et à interpréter dans le cas des bétons carbonatés, la corrosion nécessitant la présence d'eau, il semble intéressant de considérer le suivi de la teneur en eau dans les bétons comme indicateur de risque de corrosion.

Enfin, la nécessité d'identifier des traitements de la corrosion des armatures dans les bétons anciens, dans la perspective de mieux en assurer la conservation est aujourd'hui de plus en plus prégnante.

Dans un contexte de plus en plus fort de gestion de patrimoine vieillissant, qui engendre des coûts de maintenance et/ou de réparation importants, cette thématique de recherche dédiée à l'étude de la corrosion des armatures et des conditions d'humidité propices à la corrosion des armatures dans les bétons armés, processus particulièrement délétère, trouve sa finalité non seulement dans la prédiction de la durabilité des structures en béton armé (monuments historiques et ouvrages d'art), mais également dans la perspective de la compréhension de l'impact du changement climatique.

Le pôle béton du LRMH décline donc cette thématique au travers de 4 projets, évoqués ci-après

CANOPEE (CApteurs NOyés versus Potentiels-rEsistivitE-polarisation) : suivi *in situ* de la corrosion des armatures dans les bétons carbonatés

Durée : Septembre 2013 - octobre 2017

L'objectif principal du projet CANOPEE, supporté financièrement par le Réseau d'excellence francilien sur les matériaux oxydes- OxyMORE (DIM-Oxymore), est de comparer et de tenter une corrélation entre les résultats obtenus à l'aide des capteurs noyés dans du béton armé et ceux obtenus depuis le parement en béton, non seulement en termes de grandeurs spécifiques liées à la corrosion, mais également de suivi environnemental.

Pour mener à bien ce projet, plusieurs séries de dalles en béton armé respectivement à base de CEM I et de CEM III vont être confectionnées en collaboration avec le CSTB-Paris et le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement. (CEREMA) de Saint-Brieuc. Certaines dalles seront instrumentées, d'autres non. Dans chaque dalle instrumentée, 5 types de capteurs seront noyés dans le béton :

- des ERE20 (FORCE Technology), sondes de références destinées à la mesure de potentiel ;
- des HMP110 (VAISALA), capteurs permettant des mesures de température et d'humidité relative dans le béton ;
- des MultiRing Electrode (IBAC-RWTH), capteurs de résistance électrique ;
- des Anode Ladders (IBAC-RWTH), capteurs permettant des mesures de température, résistivité, potentiel et courant de corrosion ;
- et des Lames Orphelines (BouyguesTP) qui sont de fines (100µm d'épaisseur) pièces en fer blanc, circulaires, de diamètre croissant en fonction de l'épaisseur d'enrobage, indépendantes les unes des autres et espacées latéralement.

Une fois la cure du béton achevée, elles seront transportées en Belgique au Centre scientifique et technique de la construction (CSTC) pour subir une carbonatation artificielle, dont la durée, pour que le front de carbonatation atteigne les armatures, est estimée à un an pour les dalles de CEM I. Durant cette période, des acquisitions de données à partir des capteurs noyés seront régulièrement réalisées, afin notamment de corréler progression de la carbonatation et initiation de la corrosion par le biais des capteurs d'alerte (Anode Ladders). Dès que la carbonatation totale sera achevée, les dalles seront rapatriées dans la cour du LRMH, pour être exposées aux intempéries. En parallèle de l'instrumentation noyée dans le béton, des mesures non destructives seront alors réalisées depuis la surface (potentiel, résistivité, résistance de polarisation, micro-ondes, thermographie IR), 4 fois par an (saisons) et au voisinage d'épisodes de pluie.

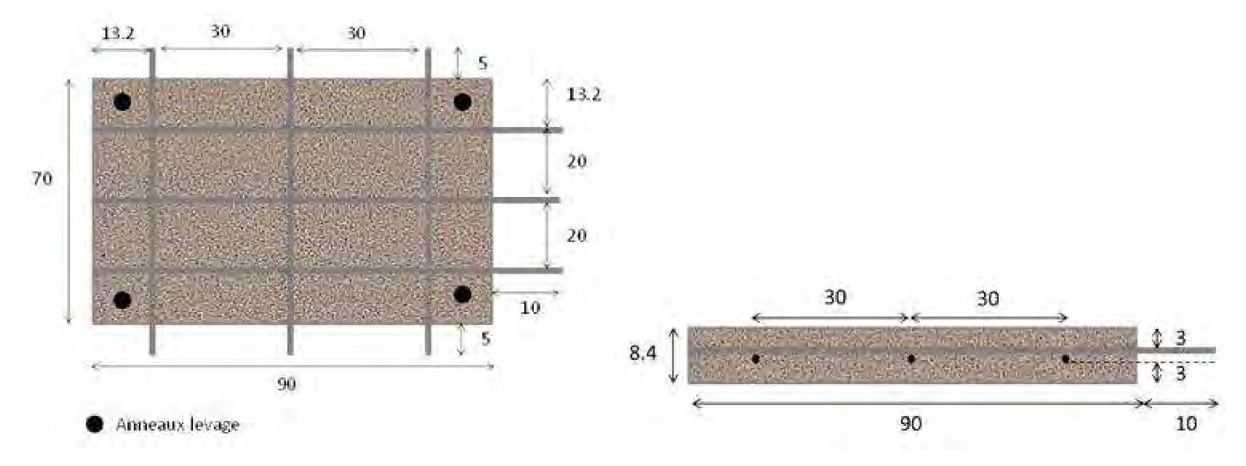


Figure 97 : schéma des corps d'épreuve du projet CANOPEE (dimensions en cm).

Collaboration : IFSTTAR Paris (Véronique Bouteiller).

Personnel permanent : Élisabeth Marie-Victoire, Myriam Bouichou.

Financement : DIM-Oxymore.

Montant : 20 077 €.

APOS : Auscultation Pour des Ouvrages Sûrs

Durée : janvier 2014 – décembre 2015

En 2013, le pôle Béton du LRMH a été invité à participer à une opération de recherche stratégique et incitative (ORSI) de l'IFSTTAR, dénommée APOS (Auscultation pour des ouvrages sûrs), sur la durabilité des câbles et armatures dans le béton et sur les relations entre indicateurs et observables en vue d'obtenir des gradients dans le béton. Un des objectifs consiste à instrumenter la teneur en eau et en sels, mais aussi les phases d'incubation, d'initiation et de propagation de la corrosion dans des bétons armés soumis à une pollution externe par des ions chlorure, par le biais de capteurs noyés et de contrôles non destructifs (depuis le parement en béton).

Des corps d'épreuve en béton armé à base de CEM I et de CEM III, instrumentés ou non instrumentés ont été coulés en 2013. À l'issue de 28 jours de cure, une période de séchage de plusieurs mois a été respectée. Puis à partir de septembre 2014, les dalles ont été soumises à une imbibition capillaire, soit dans de l'eau, soit dans une solution contenant des ions chlorure. Plusieurs séries de mesures ont alors été réalisées au fur et à mesure de la montée du front d'imbibition, afin de caractériser cette phase d'incubation (teneur en eau, en sels, présence de gradients…). Différents outils analytiques ont été utilisés, que ce soit par le biais des capteurs noyés dans le béton, ou par des contrôles non destructifs réalisés depuis le parement (méthodes électrochimiques, électro-magnétiques, résistives ou capacitives).

Un second type de mesures a ensuite été programmé en octobre 2014, dans le but de caractériser les phénomènes de corrosion, là encore en menant en parallèle acquisition de données issues des capteurs noyés et contrôles non destructifs depuis la surface de béton. De nouvelles campagnes de mesures destinées à suivre la progression de la corrosion des armatures sont programmées en 2015.

Les finalités de cette expérimentation sont multiples :

- comparaison et corrélation entre capteurs noyés et contrôles non destructifs ;
- exploitation des résultats pour la prédiction de la durabilité (incubation, initiation, propagation de la corrosion) ;
- modélisation des phases d'incubation et de propagation.

Collaboration : IFSTTAR Paris (Véronique Bouteiller), IFSTTAR Nantes (Géraldine Villain, Odile Coffec, Mila Fares, Xavier Dérobert, Xiaoting Xiao, Laurent Gaillet), CEREMA Saint-Brieuc (Benoît Thauvin, Ronan Queguiner, Pascal Boulaire, Stéphane Pasquiet, Tiffany Desbois, Christelle Lestrehan, Stéphane Gilbert), CEREMA Angers (Amine Ihamouten, Marc Brenugat, Frédéric Bosc).

Personnel permanent : Élisabeth Marie-Victoire, Myriam Bouichou.

WASCO (WAter and Salt content in ancient COncrete) : application de la spectrométrie diélectrique pour la mesure des teneurs en eau et en sels dans les bétons anciens

Durée : janvier 2014 – décembre 2015

Depuis plusieurs années, l'Institut de physique appliquée, du Centre national de la recherche en Italie, développe un outil de terrain nommé SUSI-R, dédié à la mesure de la teneur en eau dans les maçonneries, mais aussi à la détection de sels. Basé sur la mesure d'un contraste diélectrique entre matériau sec et humide, SUSI-R est doté d'un analyseur couplé à une sonde résonante qui fonctionne dans la gamme des micro-ondes, l'ensemble étant piloté par un logiciel dédié. La teneur en eau et l'indice de salinité sont calculés à partir des propriétés de résonance du capteur, qui sont fonction de la permittivité du matériau. Moyennant une calibration préliminaire, le système SUSI-R permet aujourd'hui de quantifier la teneur en eau de la sub-surface à la surface d'un enduit ou d'une maçonnerie homogène de pierre.

L'objectif de cette étude est de développer son application à la mesure de la teneur en eau dans différents types de bétons et mortiers anciens. Pour cela, des éprouvettes de pâtes de ciment, de mortiers et de bétons ont été fabriquées à base de ciment prompt et de ciments Portland CEM I et CEM III, et des prélèvements de bétons et mortiers anciens ont été récoltés. Ces deux types d'échantillons vont permettre la calibration des mesures SUSI-R, sur matériau sec et saturé en eau sous vide. En parallèle, dans le cadre du projet APOS ; la technique SUSI est testée, comparativement avec d'autres techniques analytiques permettant notamment des mesures de résistivité.



Figure 98 : système SUSI-R (sonde, analyseur et ordinateur portable) testé sur dalle de béton armé pollué par des ions chlorure.

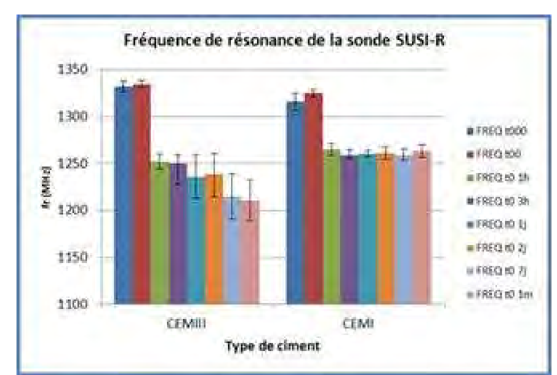


Figure 99 : moyenne des fréquences de résonance pour les dalles de ciment CEM III et CEM I après cure, mais avant séchage ; après séchage ; et après immersion dans de l'eau salée à plusieurs échéances (T0 – 1h, 3h, 1j, 2j, 7j, 1m).

Collaboration : CNR (Italie), (Cristiano Riminesi).

Personnels permanents : Myriam Bouichou, Élisabeth Marie-Victoire.

Financement : Subvention LRMH.

Montant : 10 000 €.

Étude de l'interface acier-béton dans les processus de corrosion induits par la présence de chlorures

Durée : Octobre 2014 – Septembre 2017

Deux types d'agents sont à l'origine de la corrosion des armatures dans les bétons armés. Les premiers sont exogènes tels que le dioxyde de carbone contenu dans l'air, ou les chlorures apportés par les embruns marins et les sels de déverglaçage. Les seconds sont endogènes, comme les chlorures de calcium introduits au gâchage, notamment dans le domaine de la préfabrication.

L'objectif de ce projet est, dans un premier temps, d'étudier *in situ,* l'interface acier-béton depuis le démarrage et durant la phase de propagation d'une corrosion induite soit par une carbonatation, soit par des ions chlorure et enfin lors de l'association des deux phénomènes. Dans un second temps, l'efficacité et les éventuels effets secondaires du traitement électrochimique d'extraction d'ions chlorure (ou déchloruration) seront étudiés. Le but de cette seconde étape sera d'étudier l'interface acier-béton, lors de l'extraction électrochimique d'ions chlorure endogènes ou exogènes, dans des bétons affectés ou non par une carbonatation. Le protocole analytique comportera trois aspects : le suivi électrochimique de la corrosion (potentiel, résistivité, résistance de polarisation), l'analyse *in situ* des produits de corrosion par micro-spectroscopie Raman et l'observation de l'interface acier-béton au MEB+EDS. Les essais seront notamment réalisés sur des mini-éprouvettes de béton, dont le design a été spécialement développé lors d'une précédente thèse (Fig. 100).



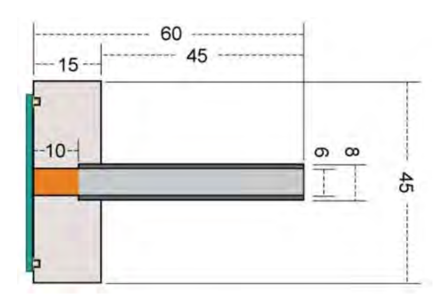


Figure 100 : corps d'épreuve destinés aux analyses in situ *des produits de corrosion par micro- spectroscopie Raman, mis au point dans le cadre de la thèse de Y.Y. TONG, sur les traitements de réalcalinisation du béton, réalisée en partenariat entre l'IFSTTAR, le Lise et le LRMH (dimensions en mm).*

Collaboration : IFSTTAR Paris (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) (Véronique Bouteiller), UMPC-LISE (Laboratoire Interfaces et systèmes électrochimiques) (Suzanne Loiret), UPE (Université Paris Est) - École doctorale sciences, ingénierie et environnement (SIE) – ED 531

Doctorante : Yolaine Tissier

Personnel permanent : Élisabeth Marie-Victoire, Myriam Bouichou.

Montant : 54 850 €

3.2.2 Recherches sur la conservation et la restauration du patrimoine

ARTEMIE – Argiles et TEOS ou la consolidation des tablettes mésopotamiennes

Durée : novembre 2012 - octobre 2014

La conservation-restauration des tablettes cunéiformes, objets archéologiques fragilisés par leur utilisation il y a quatre millénaires, leur enfouissement jusqu'aux fouilles dans les années 1930, et leurs conditions de conservation dans les musées (modifications inévitables de température et d'humidité relative), fait partie des préoccupations des conservateurs et des restaurateurs des institutions dans lesquelles elles sont conservées. Deux pratiques attestées de consolidation, nécessaires pour pouvoir les dessaler, puis les conserver et les manipuler, la cuisson et l'application d'un TEOS (silicate d'éthyle), ont été mises en œuvre, notamment au British Museum et au musée du Louvre. Cependant, la cuisson induit de nombreuses modifications physico-chimiques, ou plus simplement de couleur au sein des objets en terre crue. Les transformations de phase induites par la cuisson entraînent des modifications de la matière originelle des objets. C'est pourquoi le musée du Louvre préfère la consolidation par application de TEOS, produit organique exogène, induisant également une modification globale du matériau, mais respectant les matériaux originaux.



Figure 101 : liste divine sumérienne. Face AO5376.

Le projet ARTEMIE dans lequel le laboratoire est impliqué répond ainsi à la demande du département des Antiquités orientales du musée du Louvre, de valider le protocole de traitement proposé par Anne Liégey, restauratrice. L'étude a ainsi porté sur les liaisons créées entre les argiles présentes majoritairement dans ces tablettes cunéiformes et ce TEOS. Les analyses scientifiques mises en œuvre (étude des propriétés mécaniques du comportement hygrique, de la perméabilité) ont permis de mieux comprendre les interactions en jeu. Pour cette étude, des éprouvettes reproduisant au mieux les propriétés minéralogiques et structurales des tablettes ainsi que leurs conditions d'altération ont été préparées.

Les résultats obtenus mettent en évidence une interaction différente du silicate d'éthyle selon la nature des argiles. Les interactions du TEOS avec la kaolinite, caractéristique d'un empilement de type T-O (tétraédrique-octaédrique), sont efficaces et ne sont source d'aucun dommage significatif. En revanche, les argiles T-O-T présentant ou non des cations solvatables en position interfoliaire, sont très réactives en contact du silicate d'éthyle. Le délitage rapide et prononcé, observable à l'échelle macroscopique, est attribué à la piètre qualité des liaisons surfaciques, générant une anisotropie de comportement due à l'accessibilité inhomogène des sites réactionnels. La quantité et la distribution des groupements hydroxyles présents à la surface de ces différentes argiles influencent grandement la qualité du traitement de consolidation au TEOS.

Collaborations : C2RMF (Anne Bouquillon, Patrice Léhuédé), DAO - Musée du Louvre (Béatrice André-Salvini), Anne Liégey (restauratrice), Géosystèmes (Annette Hofmann, Viviane Bout-Roumazeilles, Philippe Recourt), CEMEF (Alain Burr, Bernard Monasse, Évelyne Darque-Cerretti).

Personnel permanent : Ann Bourgès, Jean-Didier Mertz.

Vacations et CDD : Mathilde Tiennot.

Communication orale avec actes :
Tiennot M., Liégey A., Bourgès A., Mertz J.D. *[et al.]*. 2014. Clays, unbaked earth tablets, and ethyl silicate : towards an understanding of the consolidation mechanisms. *In* : Bridgland J., ed. *ICOM-CC, 17th Triennial conference: preprints, Melbourne, 15-19 September 2014*, Paris, International council of Museums, réf. 0504-405.

Communication orale sans actes :
Tiennot M., Bourgès A., Mertz J.D. 2014. Clays, archeological tablets and ethyl silicate: evaluation of the consolidation mechanisms. *16th international conference on experimental mechanics, ICEM 16, Cambridge, July 7-11 2014.*

Financement : PNRCC - Ministère de la Culture et de la Communication.

Montant : 42 760 €.

Consolidation de fibres textiles par pulvérisation de protéines de soie

Durée : 2014-2015

Nous proposons en collaboration avec le laboratoire Monaris de l'université Pierre et Marie Curie de consolider le tissu de soie fragilisé par imprégnation/pulvérisation de fibroïne soluble de soie afin d'obtenir une matrice supportant les fibres du tissus tout en préservant l'aspect visuel.

La fibre de soie naturelle est composée de deux protéines : la fibroïne insoluble qui constitue les deux brins de soie et la séricine, gaine protectrice hydrophile. Historiquement, la soie est le plus souvent « décreusée », c'est-à-dire dépourvue de la gaine de séricine afin d'en faciliter la teinture. Au sein du laboratoire Monaris, il sera possible d'obtenir à la fois de la séricine pure, ainsi que de la fibroïne soluble purifiée obtenue à partir de cocons de bombyx mori. Ces solutions, soit de séricine, soit de fibroïne s eront utilisées pour consolider les fibres d'organismes préalablement vieillies au Xenotest.L'efficacité des imprégnations de séricine et/ou fibroïne sera étudiée par tests mécaniques de traction uniaxiale (Monaris) de fibres dégradées aux UV, ainsi que par microscopie électronique (Monaris). Cette méthodologie de consolidation sera appliquée aux tissus (avec le LRMH). L'aspect visuel des dépôts sur tissu sera évalué par des mesures au brillancemètre. Des tests de pliage seront aussi effectués pour suivre la souplesse des tissus ainsi consolidés. D'autre part les questions inhérentes à la durabilité/réversibilité de la consolidation devront être considérées (résistance à l'humidité de l'air, par exemple).

Cette approche multidisciplinaire définit un angle de recherche appliquée innovant et pourrait donner lieu à de futurs programmes (ANR, Sorbonne Universités, LabEx Michem…).

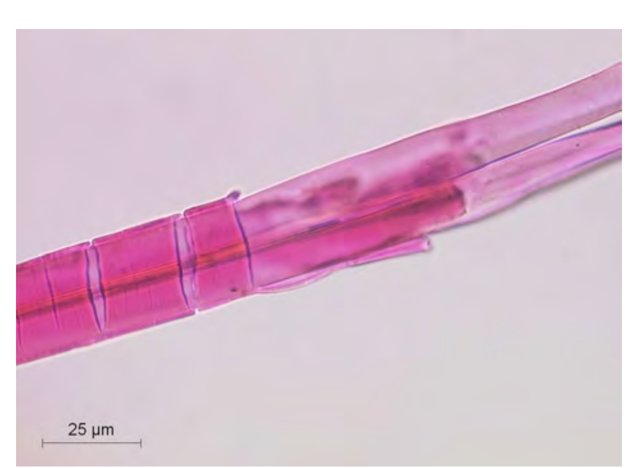


Figure 103 : vue longitudinale d'un filament de soie grège coloré à l'éosine et observé en microscopie optique. Le filament se compose de 2 brins de fibroïne maintenus dans une gaine de séricine.

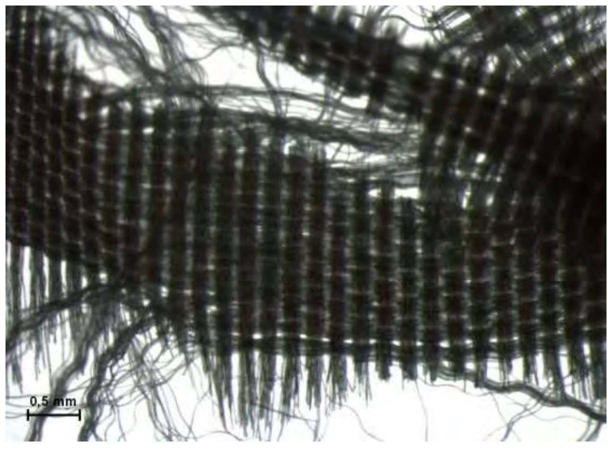


Figure 102 : tissu de soie dégradé.

Collaboration : Université Pierre et Marie Curie, laboratoire Monaris « de la molécule aux nano-objets : réactivité, interactions et spectroscopies ». UMR 8233 CNRS-UPMC (Aline Percot, Sylvie Noinville)

Personnel permanent : Dominique De Reyer

Communication orale sans actes :

Fraysse A., Wojcieszak M., Percot A., Noinville S, Marcellan A., De Reyer D., Colomban P. 2014. Consolidation of silk fabric by fibroin spraying and sericin dipping. *In* : *Gordon research conference: Scientific methods in cultural heritage research: challenges and complexity in characterization and conservation, Newry, Maine (USA), 27th July-1st August 2014.*

Montant : 13 000 €

Développement de couches antibiofilm à partir de glycolipides fonctionnalisés d'origine biologique : études fondamentaux d'adsorption sur silice et application dans la protection de matériaux (roche calcaires, bétons) d'intérêt historique

Durée : 2012-2015

La protection des matériaux du patrimoine vis-à-vis des micro-organismes est un défi permanent pour tous les microbiologistes. Dans le cadre de cette thèse, les propriétés biocides à impact environnemental réduit de plusieurs glycolipides naturels d'origine microbienne (FIG. 104) sont étudiés et cela à des fins de protection de la surface des matériaux du patrimoine historique français.

Le but de la thèse est multiple : étudier en détail les interactions entre glycolipides et les différents matériaux ; comprendre le comportement des micro-organismes sur les surfaces modifiées par les glycolipides ; tester les propriétés biocides sur des substrats modèles et sur des substrats réels.

L'étude porte surtout sur une caractérisation fine des interactions entre glycolipides et surface. L'accessibilité des carbohydrates est particulièrement évaluée et, dans la phase finale du projet, l'efficacité de la couche protective vis-à-vis des actions antimicrobiennes ainsi que les mécanismes d'interaction entre glycolipides et micro-organismes sont étudiés.

Le projet se déroule en trois étapes :

(a) Greffage covalent + (b) Dépôt par interactions non-covalentes. (FIG. 105)
L'expertise du laboratoire de chimie de la matière condensée de Paris (LCMCP) et du laboratoire de réactivité de surface (LRS) sont mises à contribution pour mener à bien ces deux parties. La possibilité de greffer chimiquement les glycolipides ainsi que de déposer des multicouches sous forme d'agrégats micellaires est étudiée. L'étude de l'influence de la technique de déposition et des paramètres physico-chimiques du milieu sur la forme et la taille des agrégats constitue une partie importante du projet. Des analyses par IRTF, XPS, SAXS (diffusion de rayons-X aux petits angles) servent, entre autre, à mettre en évidence la présence des glycolipides et leur état d'agrégation, alors que l'utilisation d'agents de couplage fluorescents et sélectifs des sucres sert à clarifier leur positionnement relatif à la surface.

c) Test des propriétés biocides. Cette partie est réalisée en collaboration avec le LRMH. Des tests préliminaires sur l'effet biocide sont préalablement réalisés sur des souches bactériennes non pathogènes et dans un objectif de protection des matériaux du patrimoine ; les effets biocides envers des souches sélectionnées de champignons et algues seront étudiés. L'influence de la nature des interactions entre glycolipides et substrat par rapport à la croissance microbienne des souches est également étudiée.

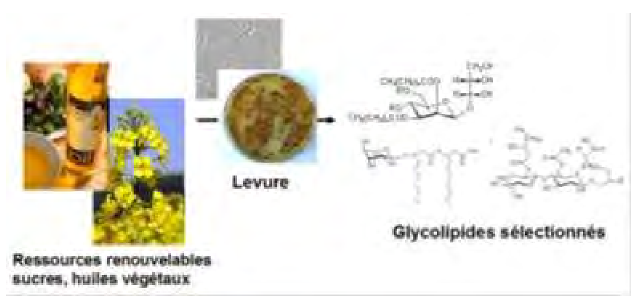


Figure 104 : production de sophorolipide par des levures cultivées sur un substrat composé d'acides gras d'origine végétale.



Figure 105 : schéma des modes de protection des matériaux.

L'activité antibactérienne des surfaces greffées avec des sophorolipides a d'abord été testée sur deux bactéries gram-positives *Listeria ivanovii* et *Staphylococcus epidermidis,* et sur une bactérie Gram-négative *Escherichia coli.*

Les résultats obtenus par des observations par microscopie à force atomique (AFM) et microscopie électronique à balayage à effet de champ (MEB-FEG) montrent les dommages causés par les sophorolipides aux bactéries. La lyse des membranes cellulaires est confirmée par fluorescence. La diminution de la viabilité des bactéries est également mise en évidence par des tests de croissance sur milieux de culture.

Ces premiers résultats démontrent que les sophorolipides greffés sur des surfaces conservent leurs propriétés biocides et ouvrent ainsi de nouvelles perspectives dans le domaine du développement de revêtements de surface préventifs des matériaux en général et des matériaux des monuments historiques en particulier.

Collaboration : Laboratoire de réactivité de surface, UPMC-CNRS, Paris, (Vincent Humblot), Laboratoire de chimie de la matière condensée de Paris, UPMC-CNRS-Collège de France, (Niki Baccile)

Personnel permanent : Faisl Bousta, Geneviève Orial

Doctorant : Claire Valotteau

Communication orale avec actes :

Valotteau C., Humblot V., Baccile N., Bousta F. 2014. Development of protective biocidial coatings using eco-friendly biosurfactants. *In : European conference on Biodeterioration of stone monument, Université de Cergy-Pontoise, 7 novembre 2014*, actes à paraître.

Financement : LabEx Matisse : Axes 3 et 2. Thématiques : Interfaces, transport, reactivity in natural media et Multifunctional materials and environment.

Montant : 35 000 €

Étude sur la faisabilité de l'utilisation de nanoparticules de chaux en suspension alcoolique pour la consolidation des peintures mayas de la grotte Naj Tunich (Guatemala)

Durée : janvier 2013 - juin 2013

L'objectif était de déterminer la faisabilité d'un traitement de consolidation par l'utilisation de nanoparticules de chaux sur des peintures de type maya ainsi que d'en vérifier l'efficacité dans des conditions climatiques particulières de grotte en milieu tropical, à savoir une température (supérieure à 20 °C) et une humidité relative (supérieure à 99 %) élevées. Le Calosil E25® a été testé sur un éventail d'échantillons préparés selon la technologie des peintures mayas et conditionnés dans une enceinte climatisée. Des échantillons de reconstitution proches de ceux de la grotte ont été choisis : dolomie provenant de la carrière de Leuilly-sous-Coucy et présentant une pulvérulence en surface proche de celle des parois de Naj Tunich, ainsi que du pigment noir d'os artisanal issu de la combustion d'os de mouton.

Une série d'analyses a été effectuée sur ces échantillons afin d'établir celui dont la carbonatation des particules de chaux s'est effectuée le plus profondément, sans blanchir la surface peinte. L'étude s'est déroulée sur 15 semaines et a consisté en : la mise au point du protocole, les analyses préliminaires et les tests préalables, la phase de traitement et les analyses post-expérimentales. Le test de faisabilité en lui-même a duré quatre semaines afin d'avoir au moins une semaine de séchage entre chaque application de Calosil®. Les résultats des analyses (porosité au Hg, DRX, MEB, IRTF, tests au scotch, suivi photographique, coloration à la phénolphtaléine) postérieures au traitement, ont montré que la consolidation de la dolomie était effective. La pulvérulence en surface des échantillons a fortement diminué. Les nanoparticules de chaux se sont bien carbonatées en formant de la calcite. L'application semble assez homogène et la pénétration des nanoparticules est visible jusqu'à plusieurs millimètres dans la roche. Les blanchiments observés semblent liés à la carbonatation en surface des nanoparticules de chaux et à la variation de composition des dolomies limitant la pénétration des particules ou à l'évaporation trop rapide de l'éthanol. Les tests au scotch ont indiqué peu de variations de pulvérulence entre les carottes consolidées avec deux ou quatre applications. L'utilisation du Calosil® à 5,5 g/L en deux applications semble la plus adéquate.



Figure 106 : injection de nano-chaux dans les roches de reconstitution.

Collaboration : projet interne au LRMH (pôle Grottes Ornées, pôle Peintures murales et polychromie).

Personnel permanent : Stéphanie Touron, Dominique Martos-Levif.

Stagiaire : Morgane Duroux, (Master 1 – Conservation-restauration des biens culturels de Paris 1).

Financement : interne LRMH.

La gestion des collections textiles contre les infestations. Exploration des moyens de prévention à partir des études sur la mite des vêtements *T. Bisselliella.*

Durée : 2012-2013

Ce programme de recherche poursuit le travail sur la prévention des infestations. Des connaissances plus poussées sur la biologie des insectes sont toujours nécessaires pour mieux appréhender les différents systèmes de communication (chimique, visuelle et sonore), dont ils disposent et pour mieux connaitre leur comportement (FIG. 107).


Figure 108 : larves de T. Bisselliella *sur un textile attaqué.*

Le piégeage est une aide à la détection des infestations de mites et son efficacité sera améliorée par le choix et la nature de l'attractif utilisé. Au cours de ce travail, nous avons étudié la densité de population capturée grâce à l'attractif sexuel phéromonal de synthèse, commercialisé par Finicon®. L'étude a porté sur de grands effectifs de population afin de déterminer le pourcentage de mites contrôlées par ce système.

La réalisation d'un test à grand effectif (n=55) nous indique que 42 % de la population d'insecte est piégée sur la bande collante Finicon®, contre 11 % seulement sur le témoin. D'après le test du Khi^2, la différence du nombre d'individus piégés entre le témoin et le Finicon® est très significative. Parallèlement, le deuxième test de Khi^2 réalisé entre la proportion d'individus piégés (53 %) et non piégés (47 %) est quant à lui non significatif. Ainsi le piège Finicon® a un pouvoir suffisamment attractif pour capturer 42 % de la population d'insectes mais non encore suffisamment performant pour capturer plus de la moitié des mites et ainsi devenir un piège très efficace pour lutter contre les invasions (FIG 108). Au niveau du sex-ratio, on observe que les femelles sont largement plus présentes avec des proportions respectives de 83 % (témoin) et 77 % (individus non piégés). À l'inverse, on observe une quantité bien plus importante de mâles sur la bande collante Finicon® puisqu'ils représentent 74 % des mites capturées. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le piège collant Finicon® est un piège attractif dû à la présence d'un composé de la phéromone sexuelle femelle : (E,Z)-2,13-octadienol (Arnault *et al.,*2009). De plus, le piège Finicon® a permis de capturer 71 % des mâles présents au début de l'expérience ce qui démontre une réelle attraction et une bonne efficacité de ce piège envers les mâles.

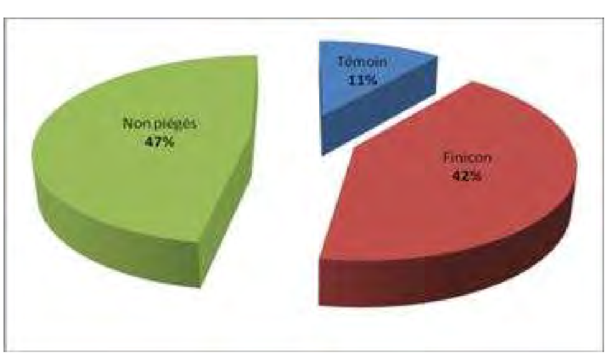


Figure 107 : pourcentage d'invididus piégés selon les modalités.

Dans la nature, les insectes utilisent les rayons lumineux pour se diriger. Les mites, elles, ne sont pas soumises à l'influence des sources lumineuses, elles sont lucifuges. On peut donc se demander si elles sont aussi sensibles que les autres espèces et si les pièges lumineux sont efficaces. Des expériences ont été réalisées pour étudier la sensibilité des mites aux UV. Le dispositif expérimental a permis d'exposer les mites à une lumière blanche (Led) et une source UV. L'efficacité du dispositif a été testée sur *Plodia interpunctelle* (mite alimentaire) dont l'attirance aux UV a été démontrée (FIG. 109).

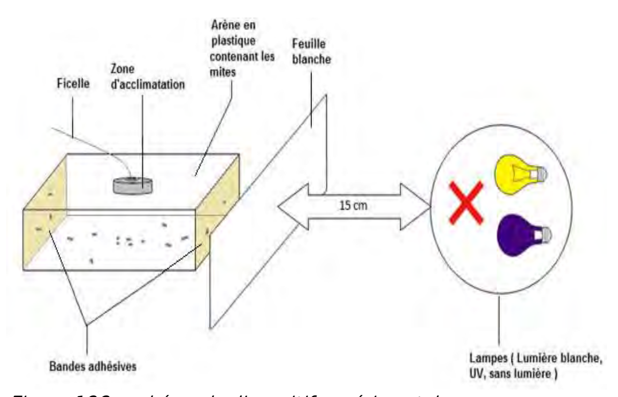


Figure 109 : schéma du dispositif expérimental.

Contrairement à d'autres espèces, l'étude du comportement des mites face à la lumière a permis de mettre en évidence une non-attractivité pour celle-ci.

D'après les résultats, les témoins ne montrent pas de différence significative entre le côté « éclairé » et le côté non éclairé. Par contre aussi bien avec la lampe Led qu'avec un éclairage UV, on observe plus de mites du côté non éclairé que du côté éclairé. La différence est significative.

	Zone éclairée	Moyenne (zone éclairée)	Zone non éclairée	Moyenne (zone non éclairée)
Témoin	12	10,3	10	11,0
	10		12	
	9		11	
UV	6	6,0	17	16,0
	8		14	
	4		17	
LED	8	7,6	14	13,3
	9		12	
	6		14	

Répartition des mites soumises aux différentes lumières

Pour explorer un nouveau champ d'investigation dans la prévention, une veille bibliographique a été faite par rapport aux effets des ultrasons. Les insectes communiquent par l'intermédiaire de phéromones sexuelles, mais aussi grâce à des signaux sonores. Ils sont en effet munis de tympans et d'organes spécialisés dans la production de sons. Ils ont acquis ce caractère lors d'interactions avec leur principal prédateur, la chauve-souris. Ils ont appris à contrer leurs chants d'écholocalisation, puis ont détourné cette caractéristique au profit d'une communication intraspécifique. Au cours de l'évolution, les signaux sonores ont pris une place importante dans le comportement reproducteur de ces insectes.

Très peu d'études ont été faites concernant *Tineola Bisselliella* car contrairement à d'autres espèces de Lépidoptères, les ultrasons ne font pas partie de leur système de communication. Il n'est donc pas possible de contrôler les mites des vêtements grâce aux ultrasons.

Collaboration : CETU Innophyt, Institut de recherche sur la biologie des insectes, Université François Rabelais de Tours, (Ingrid Arnault).

Personnel permanent : Dominique De Reyer.

Financement : subvention LRMH.

Montant : 15 000 €.

La protection des armatures en alliage ferreux dans le plâtre

Durée : pluriannuelle



Figure 110 : sculpture Amalthée et la Chèvre (n°inv RF 1685), musée du Louvre.

Cette recherche a été initiée dans le cadre du mémoire de fin d'étude d'Annabelle Sansalone, étudiante de l'Institut national du patrimoine, spécialisée en sculpture. L'objet choisi était une copie en céramique de l'œuvre *Amalthée et la chèvre de Jupiter* réalisée en marbre par Pierre Julien en 1786. Elle date du XIXe siècle mais a été restaurée en 1920. Elle est conservée au musée du Louvre (n°inv RF 1685) (Fig. 110).

L'intérieur de la sculpture est tapissé de plâtre renforcé par des armatures de fer (restauration de 1920). La statue ayant été exposée dans des conditions d'humidité élevée, une dégradation du plâtre, certainement due en partie à la corrosion des armatures de fer, a été observée. L'étudiante Annabelle Sansalone a fait appel au LRMH, *via* le pôle Métal, afin d'élaborer un projet scientifique dans le but de proposer un protocole de traitement autour de cette problématique. En effet, actuellement, les produits développés pour la consolidation des plâtres ne prennent pas en compte la présence d'armatures métalliques dont les mécanismes d'altération sont directement liés aux propriétés du milieu où elles sont placées.

Il a été particulièrement proposé de réaliser une étude comparée des effets du Wacker® BS OH-100 et du Paraloïd® B72 (produits de consolidation) en imprégnation, sur le plâtre et sur le développement de la corrosion. Cette étude comparative a impliqué la mise en place (fabrication d'éprouvettes, mode d'imprégnation…) de nombreux tests de vieillissement (en enceinte climatique et en atmosphère extérieure) et mobilisé une batterie de techniques d'analyses (microscopie optique et électronique, porosimétrie, test de la goutte) afin d'optimiser l'interprétation des résultats complexes alors obtenus. Bien que de nombreuses nouvelles interrogations soient apparues à l'issue de cette étude, ces premières conclusions ont permis de contribuer à la caractérisation de certains effets de l'imprégnation du plâtre par le Paraloïd®B72 d'une part et le Wacker BS OH-100 d'autre part (localisation dans le plâtre, résistance aux vieillissements accélérés, influence sur la porosité). La poursuite de cette recherche, avec la mise en place d'essais sur un plus long terme est indispensable si l'on souhaite décrire plus précisément l'efficacité de ce type de traitement.



Figure 111 : éprouvettes de fer enrobées de plâtre en cours d'imprégnation de Paraloïd B72 © Annabelle Sansalone.

Personnel permanent : Annick Texier, Aurélia Azéma.

Publications :

SAINT-DENIS (Seine-Saint-Denis, 93). Institut national du patrimoine. Les armatures en alliage ferreux dans le plâtre : étude comparée des effets du Wacker BS-OH-100® et du Paraloïd B72® : compte-rendu d'analyses / Azéma A., Sansalone A. *(Rapport LRMH n° 1380A, en cours)*

Sansalone A. 2014, Spécialité Sculpture. *Amalthée et la chèvre de Jupiter (musée du Louvre). Étude et Conservation-Restauration d'une sculpture en terre cuite peinte réalisée d'après le marbre de Pierre Julien. Recherche d'un système de protection contre la corrosion des armatures en alliage ferreux dans le plâtre : étude comparée des effets du Wacker BS-OH-100 et du Paraloïd B72.* Mémoire de fin d'étude INP, partie technico-scientifique effectuée sous la direction du LRMH.

Méthode alternative aux traitements chimiques dans le contrôle et l'éradication des micro-organismes chlorophylliens.

La prolifération excessive et nuisible des micro-organismes tels que les micro-algues vertes, cyanobactéries, bactéries et champignons, est un problème majeur tant en milieux aquatiques (bloom de cyanobactéries, problème d'eutrophisation…) qu'en milieux terrestres (prolifération d'espèces pathogènes en milieu médical ou dans le domaine de l'industrie agro-alimentaire…). Ces problématiques concernent aussi le domaine de la conservation des matériaux du patrimoine où la prolifération de ces micro-organismes peut engendrer des phénomènes de biodétérioration menaçant l'intégrité de sites à forte valeur patrimoniale. De nos jours, l'emploi de produits chimiques (algicides, fongicides ou plus largement les biocides) pour lutter contre ces perturbations biologiques est largement critiqué depuis la directive européenne de 1998 régulant et limitant la mise sur le marché des produits biocides. La recherche de procédés plus respectueux de l'environnement est donc un des enjeux des sciences au service de la conservation du patrimoine afin de trouver des méthodes alternatives aux produits chimiques. Depuis 2007, dans l'optique de limiter l'emploi de tels produits, le pôle Microbiologie du LRMH a choisi de développer une méthode alternative efficace et plus respectueuse de l'environnement : l'exposition à un rayonnement ultraviolet à basse longueur d'onde, c'est-à-dire très énergétique. Le premier travail de thèse s'est donc focalisé sur l'effet des UV-C sur les microorganismes chlorophylliens et le second projet s'intéresse à l'impact des UV-C sur les pigments préhistoriques.

Utilisation du rayonnement UV-C biocide comme alternative aux traitements chimiques dans le contrôle et l'éradication des micro-algues, cyanobactéries et champignons contaminants des milieux obscurs

Durée : septembre 2010 – novembre 2014

Ce travail de thèse constitue une des premières avancées concrète sur l'utilisation des UV-C dans le domaine de la conservation du patrimoine. Il se situe à l'interface entre plusieurs disciplines scientifiques (physiologie végétale, microbiologie, biologie moléculaire, écophysiologie, conservation du patrimoine…) et a pour principal objectif, à travers des études et analyses menées en conditions contrôlées au laboratoire ainsi que sur le site d'étude de la grotte des Moidons, de comprendre et de mettre en évidence l'effet du rayonnement UV-C comme méthode alternative aux traitements chimiques pour lutter contre la prolifération des micro-organismes photosynthétiques tels que les algues.

Le contexte particulier dans lequel nous avons décidé de travailler est celui de la conservation des grottes touristiques où la prolifération des micro-organismes chlorophylliens tels que les micro-algues vertes est un problème majeur pour les conservateurs et où l'utilisation d'algicides ou autres produits biocides peut causer de sérieux problèmes de pollution (infiltration dans le réseau karstique, pollution des nappes phréatiques).

Deux approches complémentaires ont été utilisées dans ce travail d'une part, une approche théorique au laboratoire, dans laquelle nous avons étudié l'effet des UV-C sur différentes souches cavernicoles d'algues à l'échelle cellulaire, moléculaire et du biofilm, et d'autre part, une approche pratique sur le terrain (site d'étude de la grotte des Moidons), où nous avons étudié les dynamiques et facteurs influençant la colonisation algale et testé l'efficacité de traitements UV-C sur des biofilms proliférant sur différentes formations carbonatées.

Les résultats obtenus en conditions contrôlées au laboratoire montrent que les UV-C causent de sérieux dommages au niveau cellulaire (baisse de la viabilité et de l'activité photosynthétique, dégradation des chlorophylles, induction du stress oxydatif…), moléculaire (dégradation de l'ADN) ainsi qu'à l'échelle du biofilm d'algues (diminution de la surface d'occupation, variations colorimétriques…).

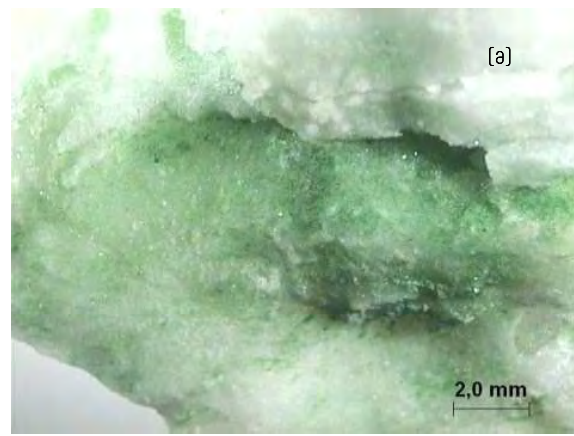


Figure 112 : essais en laboratoire sur un biofilm d'algue sur du marbre.
(a) : avant traitement *(b) : après traitement.*

Les expériences et études menées à la grotte des Moidons ont permis d'une part, de comprendre les dynamiques de la colonisation en fonction de paramètres mesurés à l'échelle du biofilm (quantité de lumière, type de support…) et à l'échelle de la cavité (courants d'air, circulations horizontale et verticale des eaux, facteurs liés à l'activité touristique…) et d'autre part, de mettre en évidence l'efficacité du traitement UV-C dans le temps par la mise en place d'un suivi colorimétrique et photographique.

Ces travaux de thèse ont apporté des connaissances sur les effets du rayonnement UV-C à différents niveaux d'organisation biologique sur des souches cavernicoles de micro-algues vertes. Ils ont également permis de mettre en évidence l'efficacité de la méthode en conditions réelles dans une grotte et sur d'autres sites. Ces travaux apportent également des réponses préliminaires quant aux effets des UV-C sur des souches de champignons filamenteux et sur plusieurs types de matières picturales.

La thèse a été soutenue le 14 novembre 2014 et les résultats obtenus sont très prometteurs. Une seconde thèse, en continuité de celle de Fabien Borderie, a débuté en septembre 2014 ; celle-ci est également financée par la région Franche-Comté, l'université de Franche-Comté et le LRMH.

Collaboration : Laboratoire de Chrono-Environnement, Besançon (Laurence Alaoui-Sehmer, Badr Alaoui-Sossé, Lotif Aleya).

Personnel permanent : Faisl Bousta, Geneviève Orial, Alexandre François.

Doctorant : Fabien Borderie.

Communications :
Au cours de la thèse 3 articles et 1 chapitre de livre ont été publiés dans différents journaux ou ouvrages à caractère scientifique.

Borderie F., Alaoui-Sehmer L., Raouf N., Bousta F., Orial G. *[et al.]*. 2011. UV-C irradiation as a tool to eradicate algae in caves. *International biodeterioration & biodegradation*, 65 : 579-584.

Borderie F., Alaoui-Sehmer L., Raouf N., Bousta F., Orial G. *[et al.]*. 2012. UV irradiation as an alternative to chemical treatments: a new approach against algal biofilms proliferation contaminating building facades, historical monuments and touristic subterranean environments. *In* : Krueger D., Meyer H., eds. Algae. New York, Nova science publ. p. 1-27.

Borderie F., Tête N., Cailhol D., Alaoui-Sehmer L., Bousta F. *[et al.]*. 2014. Factors driving epilithic algal colonization in show caves and new insights into combating biofilm development with UV-C treatments. *Science of the total environment*, 484 : 43-52.

Borderie F., Alaoui Sehmer L., Bousta F. *[et al.]*. 2014. Cellular and molecular damage caused by night UV-C irradiation of the cave-harvested green alga *Chlorella minutissima*: implications for cave management. *International biodeterioration & biodegradation* , 93 : 118-130.

Financement : CNRS délégation Centre-Est, région Franche-Comté, université Franche-Comté et LRMH (MCC).

Montant : 110 000 €.

Effets des UVC sur les pigments préhistoriques

Durée : mars 2014 - août 2014

L'effet des UV-C sur les micro-organismes a été étudié dans le cadre de la thèse de Fabien Borderie. Cependant, il n'existe que peu d'études traitant des effets de l'exposition de matière picturale aux UV-C. Or, dans le cadre d'une application de ce traitement en grotte ornée et potentiellement sur des œuvres pariétales peintes, il paraissait indispensable de s'intéresser à cet aspect. Le choix des matériaux étudiés s'est porté sur les principaux pigments identifiés sur des sites d'art rupestre : noir d'os, charbon de bois, noir de manganèse, hématite, ocres rouge et jaune. Après mélange avec les différents liants : salive synthétique, hémoglobine bovine lyophilisée et cire d'abeille naturelle, la matière picturale a été appliquée sur des supports rocheux provenant de niveaux géologiques similaires à ceux dans lesquels les grottes de Dordogne sont creusées. Diverses techniques de caractérisation avant et après exposition aux UV-C ont été utilisées (colorimétrie, DRX, MEB, MET, IRTF)

L'étude a montré que les compositions minéralogiques, les liaisons chimiques et les morphologies des particules constituant les pigments n'étaient pas affectées par les rayonnements UV-C. La stabilité des liants reste à approfondir, mais les premiers résultats montrent, comme pour les pigments, que l'exposition aux UV-C ne les altère pas.

Collaboration : Centre de compétences en microscopies électroniques et microsondes. Institut Jean - Lamour - UMR 7198 CNRS - Université de Lorraine. (Dr. Jaafar Ghanbdja).

Personnel permanent : Faisl Bousta, Stéphanie Touron.

CDD : Soizic Gibeaux.

Publication : Étude des effets de rayonnements UV-C sur de la matière picturale pour une application en grotte ornée / Gibeaux S. *(Rapport LRMH n° 1377A). En cours*

Financement : USR 3224.

Montant : 22 500 €.

Mise au point de techniques de conservation et de restauration pour *Le Cyclop*

Durée : novembre 2012- novembre 2014



Depuis sa donation à l'État en 1986 par les artistes Jean Tinguely et Niki de Saint Phalle, *Le Cyclop,* sculpture monumentale (FIG. 113), fait partie du patrimoine artistique contemporain. Cette construction hors norme et exceptionnelle par sa taille est implantée au cœur de la forêt de Milly dans l'Essonne. Elle est composée de matériaux composites, dont une mosaïque de miroirs couvrant entièrement l'une des faces et reposant sur une structure en béton et métal. Aujourd'hui, tandis que se met en place un nouveau projet de médiation et d'expositions, la restauration de cette Face aux miroirs est devenue cruciale.

Le niveau de dégradation visuelle de l'œuvre n'étant plus acceptable, les miroirs ayant perdu leur propriété de réflexion (FIG. 114), un retour à l'aspect original par le remplacement intégral des 300 m^2 de miroirs a été décidé. Au vu de la complexité de la restauration, un programme de recherche financé par le Centre national des arts plastiques a été mis en place au LRMH, *via* le Cercle des partenaires du patrimoine, afin d'étudier les techniques de restauration à mettre en œuvre.

Dans un premier temps, des observations *in situ* couplées à un travail d'analyse en laboratoire ont permis de réaliser un état sanitaire de l'œuvre, de caractériser les matériaux employés et de comprendre les causes d'altération. La principale pathologie observée consiste en l'altération du tain du miroir, qui engendre une perte de la réflexion et parfois la désolidarisation du verre. Ces altérations semblent résulter, outre de l'exposition extérieure, de deux facteurs prépondérants : une durabilité des matériaux limitée d'une part et une mise en œuvre inadaptée des différents éléments d'autre part. Ainsi, une réflexion sur ces deux axes de recherche a été menée. Des essais de vieillissement artificiel en laboratoire ont mené à la sélection d'un miroir issu de la technologie des miroirs solaires en collaboration avec Saint-Gobain Glass, miroirs développés pour une utilisation en extérieur. Parallèlement à cela, des essais *in situ* ont permis de juger des techniques de dépose et de repose des miroirs et de travailler sur les différentes étapes de mise en œuvre des matériaux.

La restauration est programmée pour l'année 2016.



Figure 113 : Milly-la-Forêt (91), Face aux miroirs (2008).



Figure 114 : détail de miroirs altérés de la Face aux miroirs.

Collaboration : Cercle des partenaires du patrimoine (CPP), Centre national des arts plastiques (CNAP), A-Corros.

Personnel permanent : Annick TEXIER, Fanny BAUCHAU, Claudine LOISEL, Aurélia AZÉMA.

CDD : Élisabeth VENAULT DE BOURLEUF (3 mois, contrat CNAP), Claire VALAGÉAS (3 mois, contrat CNRS).

Publication :
MILLY-LA-FORÊT (Essonne, 91). *Le Cyclop*, sculpture monumentale (XXe siècle) de Jean Tinguely, face aux miroirs de Niki de Saint-Phalle : état sanitaire et recherche de matériaux pour la restauration / TEXIER A., BAUCHAU F., LOISEL C., AZÉMA A., VENAULT DE BOURLEUF É. *(Rapport LRMH ; Cercle des partenaires du patrimoine n° 1276B, mai 2014)*. 157 f.

Financement : CNAP et LRMH.

Montant : 14 591,28 €.

NANOMATCH : Nano-systèmes pour la conservation du patrimoine culturel mobilier et immobilier multi-matériaux dans un environnement en évolution

Durée : novembre 2011 - octobre 2014



Les pôles Peintures murales et polychromie, Pierre, Vitrail, Bois et Microbiologie du LRMH ont été associés à 12 autres partenaires de 5 pays différents dans le cadre de ce projet de recherche européen. Le projet avait pour but de développer une nouvelle classe de produits de conservation inorganiques, nano-structurés, conçus spécifiquement pour le traitement des matériaux du patrimoine culturel, en particulier la pierre, les peintures murales, le bois et le verre.

Le travail de synthèse chimique mené par d'autres partenaires du projet a abouti à la conception et la production de deux alkoxydes de calcium, précurseurs de consolidants pour la pierre et les peintures murales et précurseurs de composés à effet neutralisateur de pH pour le bois. Pour le verre, le précurseur développé lors d'un précédent programme européen (CONSTGLASS), un alkoxyde d'aluminium, a été amélioré pour surmonter son manque d'adhésion au substrat dans des environnements très humides.

Le LRMH, *via* le Cercle des Partenaires du Patrimoine, a coordonné l'ensemble des tâches d'évaluation en laboratoire des performances des nouveaux produits développés par le projet et de leur comparaison avec des produits commerciaux actuellement disponibles sur le marché. Dans cet ensemble, le LRMH a testé la compatibilité et la performance des nouveaux produits appliqués aux substrats pierre et peinture murale et a évalué l'impact de ces produits sur l'efficacité des biocides commerciaux sur la pierre, la peinture murale et le bois.



Figure 115 : échantillons de pierre en cours de traitement.

Pour la pierre, trois lithotypes différents (marbre de Carrare, calcaires de Savonnières et de Maastricht) ont été sélectionnés pour les tests. La compatibilité des produits avec les substrats a ensuite été évaluée, à la fois en termes de compatibilité esthétique par des mesures de couleur et en termes de compatibilité physique par des mesures des propriétés de transport de l'eau des pierres traitées. L'efficacité des traitements, notion qui inclut à la fois la profondeur de pénétration et l'effet consolidant, a été évaluée par des mesures de la vitesse des ultrasons à travers les matériaux traités, de la résistance au percement et du module d'élasticité dynamique. Une étude de microscopie a également permis d'examiner finement l'interaction des produits avec le substrat au niveau du réseau poreux.

Pour la peinture murale, l'évaluation des consolidants s'est effectuée sur des échantillons modèles, répliques des substrats historiques, constitués de deux couches de mortier de chaux recouvertes d'une couche picturale. Douze pigments de couleur et de nature chimique différentes ont été appliqués selon trois techniques différentes : fresque (pigments appliqués sur un mortier de chaux frais sans liant additionnel), pigments liés à l'huile ou pigments liés à l'œuf. La compatibilité esthétique des consolidants avec ces substrats et leur efficacité sont quantifiées par des mesures de changement de couleur et de dureté de surface.



Figure 116 : échantillons modèles de peinture murale en cours de fabrication.

Des combinaisons de produits NANOMATCH et de biocides commerciaux ont également été étudiées sur trois matériaux différents, pierre, peinture murale et bois, pour évaluer l'impact de ces produits sur l'efficacité des biocides et comprendre leur interaction. Les différents substrats ont été contaminés avec des micro-organismes spécifiques, une algue verte filamenteuse (*Klebsormidium flaccidum*) pour la pierre, des champignons pour la peinture murale (*Cladosporium sp.*) et le bois (*Coniophora puteana* et *Coriolus versicolor*) et des conditions de colonisation accélérée mises en place. Pour la pierre et la peinture murale, la vitesse et l'étendue de la colonisation ont été

quantifiées par l'analyse d'images de la surface des échantillons et par un dosage de l'adénosine-tri-phosphate au cours du temps. Pour le bois, la mesure de la perte de masse des échantillons en fin d'expérience a permis d'évaluer l'efficacité des biocides.

Le laboratoire a également conduit l'étude de durabilité des traitements pour la peinture murale, *via* un vieillissement naturel en conditions réelles. Des échantillons modèles et des échantillons historiques ont été exposés *in situ* près d'une année dans quatre sites européens : les cathédrales de Cologne (Allemagne) et d'Oviedo (Espagne), l'église du monastère de Stravopoleos de Bucarest (Roumanie) et la basilique Santa Croce de Florence (Italie). La couleur et la dureté de surface des échantillons modèles après exposition ont alors été comparées aux données expérimentales avant exposition recueillies en laboratoire.

Afin de diffuser les résultats de cette recherche, le LRMH a organisé avec succès dans ses locaux une journée étude sur les nouveaux consolidants développés dans le cadre du projet NANOMATCH pour les matériaux pierre, peinture murale et verre. Dans la matinée, les personnels du LRMH et une dizaine de partenaires européens ont présenté les principaux résultats du projet à une vingtaine de participants : architectes du patrimoine, architectes en chef des monuments historiques, conservateurs-restaurateurs. L'après-midi a été consacrée aux essais pratiques d'application de ces nouveaux consolidants à travers deux ateliers : pierre/peinture murale et verre.



Figure 117 : atelier pratique sur support pierre et peinture murale pendant la journée d'étude organisée au LRMH.

Collaboration : Institut des sciences atmosphériques et du climat (ISAC) et Institut de l'énergétique et des interfaces (IENI) du Conseil National de la Recherche (CNR) (Italie), Organisation néerlandaise pour la recherche en sciences appliquées (TNO) (Pays-Bas), Tecnalia recherche et innovation (Espagne), Fraunhofer-Institut de recherche sur les silicates (ISC) (Allemagne), AIDICO Institut technologique pour la construction (Espagne), R.E.D (Italie), Bofimex bâtiment B.V. (Pays-Bas), Œuvre de la cathédrale de Cologne (HDK) (Allemagne), Œuvre de la basilique de Santa Croce (Italie), Eschlimann atelier de conservation-restauration (France), T_O_P Surfaces GmbH (Allemagne), DUCT S.R.L (Roumanie).

Personnel permanent : Vincent Detalle (responsable scientifique), Faisl Bousta, Stéphanie Duchêne, Claudine Loisel, Dominique Martos-Levif, Emmanuel Maurin, Geneviève Orial, Véronique Vergès-Belmin.

Stagiaire : Alaina Cisotto (SUPSI – University of applied Sciences and Arts of Southern Switzerland)

CDD : Elsa Bourguignon (chef de projet opérationnel), Gabrielle Poulet.

Communication orale avec actes : Bernardi A., Favaro M., Nijland T., García O., Detalle V., Wittstadt K., Romero Sanchez M.D., Pockelé L., Kunday B., Verhey B., Brinkmann U., De' Micheli G., Labouré M., Möller B., Olteanu I. 2012. NANOMATCH: a European project to develop consolidants through the synthesis of new inorganic nanomaterials for the conservation of built heritage. *In* : *International journal of heritage in the digital era*, 1 (supplément 1) : 307-312
Favaro M., Chiurato M., Tomasin P. [...], Orial G., Bourguignon E. *[et al.]*. 2013. Alkaline earth alkoxides for conservation treatment of stone and wood in built heritage. *In : Proceedings of 3rd European workshop on cultural heritage preservation (EWCHP2013), Bolzano (Italy), 16th-18th September 2013*, Milan : Felix Verlag ed., p. 105-111.
Bonazza A., Natali I., Becherini F., Bianchin S., Bourguignon E. *[et al.]*. 2013. Climate impact and innovative materials for the preservation of built heritage : the EC NANOMATCH project. *In* : Boriani M., Gabaglio R., Gulotta D., eds. *Built heritage 2013 : monitoring conservation management, Milan, Italy, 18-20 November 2013*, Milan : Politecnico di Milano, p. 1368-1375.

Communication orale sans actes : Bourguignon E. 2014. Laboratory tests for the assessment of the efficacy, compatibility and durability of alkoxides consolidants. *NANOMATCH Final conference, Museo Correr, Venice, Italy, October 17th, 2014*.

Impact :
- Journée d'étude sur les nouveaux consolidants au LRMH, 2 juillet 2014.
- Présentation orale, journée d'étude sur le consolidant NANOMATCH A18 pour le verre « craquelé », Metropolitankapitel der Hohen Domkirche Köln, Cologne (Allemagne), 17 juillet 2014.
- Présentation orale dans le cadre du Scientific workshop - presentation of the European project NANOMATCH, Dimitrie Gusti National Village Museum, Bucarest (Roumanie), 22 septembre 2014.

Financement : 7e programme-cadre pour la recherche et le développement technologique de l'Union Européenne au titre de la convention de subvention No. 283182.

Montant : 192 840 € (CPP-LRMH) ; 2 522 798,46 € (total)

PRIMEQUAL - Étude et compréhension de la dynamique de colonisation microbienne des supports : vers l'élaboration de nouveaux traitements préventifs adaptés aux environnements intérieurs.

Durée : octobre 2011 – septembre 2013

L'objectif de cette étude était de comprendre la dynamique de colonisation microbienne des supports et de tester des traitements alternatifs aux biocides existants. Deux huiles essentielles (de thym et de menthe poivrée) et l'extrait d'ail ont été testés dans ce projet.

Le rôle du pôle Microbiologie du LRMH dans ce projet est d'identifier et de caractériser quantitativement les micro-organismes, colonisant successivement les supports, par la méthode culturale. Le Centre scientifique et technique du bâtiment a pris en charge la caractérisation quantitative de la microflore par la biologie moléculaire.

Pour cela, un banc et un protocole d'essai ont été développés afin d'assurer le suivi des contaminations fongiques et bactériennes sur différents matériaux. Ainsi, une contamination dans des conditions réelles d'exposition a pu être réalisée sur six supports (campagne n° 1), sur une période de 23 jours. Des analyses macro, microscopiques, culturales et de biologie moléculaire ont été mises en œuvre.



Bois



Plaque de plâtre

Figure 118 : exemples de supports contaminés (de gauche à droite) : 0, 2, 7, 16 et 23 jours

Ces analyses ont montré une croissance microbienne sur l'ensemble des matériaux testés avec une augmentation des charges bactériennes et fongiques durant l'essai.

Les essais par culture ont permis de distinguer deux types de comportement des supports vis-à-vis de la croissance bactérienne, un groupe constitué de la dalle de plafond, la plaque de plâtre et la toile de verre, avec une biomasse bactérienne très élevée à 23 jours, un second groupe composé de lin, bois et papier peint, de charge bactérienne moindre.

Un comportement différent est observé avec la contamination fongique où le bois se distingue des autres supports avec un nombre élevé de spores viables et de fragments mycéliens récupérés à sa surface, quelle que soit la durée d'exposition. À l'exception du papier peint, l'ensemble des supports testés présente, à 23 jours, une forte augmentation de biomasse fongique.

L'approche biomoléculaire a, quant à elle, conforté en partie ces résultats : la toile de verre étant la plus vulnérable vis-à-vis de la croissance bactérienne, le bois étant de loin le plus sensible vis-à-vis de la contamination fongique. Ces deux supports ont de fait été sélectionnés pour appréhender la dynamique de colonisation microbienne lors de la campagne n° 2.

La diversité bactérienne et eucaryote présente sur des coupons de bois et de toile de verre a été caractérisée par séquençage haut débit. 82 285 séquences d'ADNr 16S et 27 631 séquences d'ADNr 18S ont été analysées. Les résultats montrent une diversité plus haute que celle retrouvée par les méthodes culturales. Cette diversité caractérise un écosystème complexe composé de bactéries et d'eucaryotes. D'après ces résultats, la colonisation apparaît être un processus dynamique. Les *core-species* sont retrouvés aux différents temps de colonisation et sur les deux types de supports analysés par pyroséquençage, mais les abondances durant la colonisation et selon le type de support sont variables. Les résultats semblent donc montrer le rôle du support sur cette diversité aussi bien au niveau des bactéries que des eucaryotes. La présence d'amibes a également été mise en évidence. À 23 jours de colonisation, la toile de verre est majoritairement colonisée par ces amibes (Amoebozoa) avec plus de 70 % des séquences. Ceci souligne l'impact potentiel de cette microflore, sur la qualité microbiologique des environnements intérieurs et la nécessité de développer des moyens de prévention et de gestion prenant en compte la diversité microbienne dans son ensemble.

Une diversité microbienne plus importante a été observée lors de la campagne n° 1, montrant l'impact du mode de contamination et d'incubation sur la variabilité des espèces colonisatrices.

Le mode de contamination forcée utilisé lors de la campagne n° 2 a permis une colonisation fongique rapide. Ces observations pourraient être expliquées par la variabilité de la microflore aéroportée.

Ainsi, une dynamique de colonisation réaliste de produit de construction et de décoration a pu être appréhendée. Il a été mis en évidence une succession de colonisateurs et la présence d'espèces majoritaires qui se succèdent et dépendent du support de colonisation y compris avec une même contamination initiale (campagne n° 2). Cette dynamique, observée pour les bactéries et la flore fongique en quelques jours, peut être expliquée par des différences de vitesse de croissance, une variation des conditions de croissance (nutriment, humidité, espèces en compétition) ou encore la production de métabolites secondaires tels que les mycotoxines, endotoxines, ou encore COV (Fig. 119).

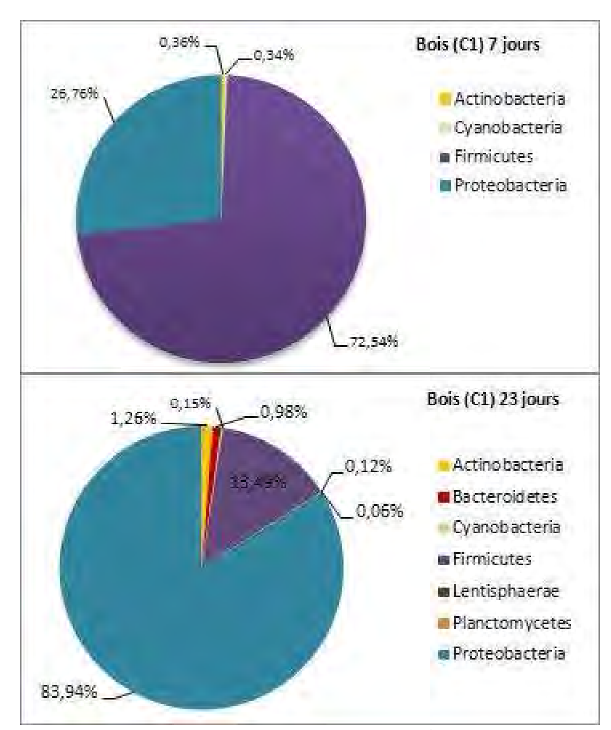


Figure 119 : abondance des phyla retrouvés sur les coupons de toile de verre et de chêne à 7 et 23 jours.

Concernant les traitements alternatifs aux biocides existants et identifiés au travers de la littérature comme possédant des propriétés antimicrobiennes, seuls l'huile essentielle de thym et l'extrait d'ail se sont révélés efficaces sur la prolifération fongique sur le bois. En effet, l'huile essentielle de menthe poivrée, troisième traitement testé, n'a limité la croissance microbienne ni sur le bois, ni sur la toile de verre. L'inefficacité constatée des trois traitements sur la toile de verre est sans doute imputable à la faible teneur en solution traitante de ce support par rapport à la charge microbienne impactée. Les résultats obtenus sur le bois corroborent les conclusions d'études visant à développer des traitements du bois à base d'huiles essentielles. L'efficacité de ces traitements reste à être démontrée sur d'autres supports.

À la lumière de ces résultats et de l'existence d'une diversité microbienne abondante et variable constatée lors des campagnes n° 1 et 2, le recours à un traitement à spectre d'action large paraît indispensable pour prévenir le développement microbien. Notamment, l'utilisation de mélanges d'huiles essentielles semble pertinente en favorisant la synergie entre molécules actives. Cependant, cette synergie reste à étudier : les interactions entre ces composantes peuvent conduire à des effets antagonistes, additifs ou synergiques. Ainsi, certaines études ont démontré qu'un mélange d'huiles essentielles présente généralement une activité antibactérienne plus élevée que les mélanges de leurs composantes principales, ce qui suggère que les composantes mineures sont essentielles à l'activité synergique, bien que des effets antagonistes et additifs aient également été observés (Davidson et Parish, 1989; Gill et al., 2002; Mourey et Canillac, 2002).

L'étude des mécanismes de croissance fongique pourrait également constituer une approche pertinente pour affiner le choix des traitements préventifs. Aussi, la poursuite de ce travail consistera à étudier les mécanismes de colonisation et de dégradation des supports par les micromycètes. Pour cela la technique d'amplification des ITS pourra être sélectionnée afin d'être plus spécifique des micromycètes.

Collaboration : Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) (Stéphane Moularat).

Personnel permanent : Faisl Bousta, Alexandre François, Geneviève Orial.

Communication orale sans actes :
Moularat S., Draghi M. (…) Bousta F., Orial G. 2013. Étude et compréhension de la dynamique de colonisation microbienne des supports : vers l'élaboration de nouveaux traitements préventifs adaptés aux environnements intérieurs. *La qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments : causes, effets, prévention et gestion des pollutions, La Rochelle, 19-20 novembre 2013.*

Rapport final :
Moularat S. […] Bousta F., Orial G. *[et al.]*. 2013. *Étude et compréhension de la dynamique de colonisation microbienne des supports : vers l'élaboration de nouveaux traitements préventifs adaptés aux environnements intérieurs = Study and comprehension of dynamics of surfaces microbial colonization to develop new preventive treatments suited to indoor environments: programme Primequal : rapport final.* Champs-sur-Marne, LRMH ; CSTB, 2013. 112 p.

Financement : Programme de recherche interorganismes pour une meilleure qualité de l'air (PRIMEQUAL).

Montant : 139 000 €.

Renforcements des structures bois par tiges collées : impact des conditions de conservation

Durée : 2010-2013

La réparation ou le renforcement d'éléments de structures bois repose actuellement sur la technique du collage structural, impliquant une connaissance précise de la tenue mécanique des joints collés et une mise en œuvre formalisée et réglementée. À ce jour, la technique des goujons collés (tiges d'acier, fibres de verre ou de carbone collées au sein du bois) est de plus en plus utilisée, car elle présente de nombreux avantages (aspects esthétiques et bonne conservation du bois originel sain). Les études en la matière ont permis de proposer un large ensemble de procédés de caractérisation et de dimensionnement, sans pour autant donner un socle commun pour l'évaluation de la performance mécanique de tels assemblages. L'intérêt des travaux actuels est de fournir aux professionnels de la filière des outils de prédiction plus robustes permettant de s'assurer de la fiabilité de ces assemblages en fonction de leurs paramètres physiques et de leurs conditions de conservation, par le biais d'abaques de dimensionnement. L'utilisation de plus en plus fréquente des goujons collés en structure, suscite également des interrogations sur le comportement thermique de tels assemblages vis-à-vis d'une situation accidentelle comme un incendie. L'approche proposée dans la présente étude repose sur le couplage et le dialogue permanent entre tests expérimentaux et modélisation numérique par éléments finis.

La stratégie de caractérisation expérimentale, à l'échelle de l'assemblage, permet de donner en un seul essai des propriétés mécaniques locales pour chaque échantillonnage de plusieurs éprouvettes, suivant divers paramètres tels que la longueur de collage, l'orientation du fil du bois, ou encore la température de l'adhésif. Ces campagnes expérimentales ont fourni des données qui ont alimenté une importante base de données, indispensable à la calibration d'un modèle éléments finis. Une fois la calibration du modèle (en élasticité) réalisée, la phase d'endommagement de l'assemblage, menant à la ruine de l'échantillon, est estimée à partir de la mécanique linéaire élastique de la rupture, reproduisant ainsi le comportement mécanique expérimental de tels assemblages (courbe force/déplacement). Un premier modèle de comportement au feu nous amène à définir des préconisations de protection minimale entre la face exposée au feu et le lieu de la réparation par goujons collés, afin d'assurer la pérennité de la structure pendant 30 minutes. Les travaux expérimentaux et numériques, développés dans le cadre d'une convention CIFRE, permettent de fournir des éléments importants dans la rédaction et l'élaboration de « règles professionnelles pour la réparation et le renforcement des ouvrages bois par des techniques de résines ». La restitution du document a été faite aux entreprises. Un avis est actuellement demandé aux bureaux de contrôle.



Figure 120 : exemple de renforcement par tiges collées

Collaboration : Institut d'ingénierie et de mécanique de Bordeaux (Stéphane Morel, Jean-Luc Coureau, Philippe Galimard), Fédération industrie bois construction (Dominique Milreux, Thomas Feret), RBR (Association des entreprises travaillant sur le renforcement de structures bois par tiges collées).

Personnel permanent : Emmanuel Maurin.

Doctorant : Julie Lartigaud.

Thèse : Lartigau J. ; sous la dir. du prof. Morel S., 2013. *Caractérisation du comportement des assemblages par goujons collés dans les structures bois*. Thèse de doctorat : Sciences physiques et de l'ingénieur : Bordeaux I, 169 p.

Communication : Lartigau J., Coureau J.L., Morel S., Galimard P., Maurin E. 2012. Effect of temperature on the load bearing capacity of glued-in rods *In : XIIth World conference on timber engineering, Auckland, 16-19 July 2012*, session 51, c13.

Association des entreprises spécialisées dans le renforcement des ouvrages et structures en bois par des techniques de résines, Fédération de l'Industrie Bois Construction, Institut de mécanique et d'ingénierie, LRMH. 2014. *Règles professionnelles pour la réparation et le renforcement des ouvrages bois par des techniques de résines.* Paris, RBC, à paraître, 44 p.

Financement : Thèse CIFRE et subvention LRMH.

Montant : 168 052 €.

3.2.3 Optimisation de techniques d'analyses ou de diagnostic des matériaux du patrimoine

CHARISMA - Cultural Heritage Advanced Research Infrastructures Synergy for a Multidisciplinary Approach to conservation/restoration

Durée : octobre 2009 – mars 2014



CHARISMA est un programme européen de mise en commun des techniques et des connaissances sur les biens culturels. Il regroupe 22 partenaires de 11 nationalités.

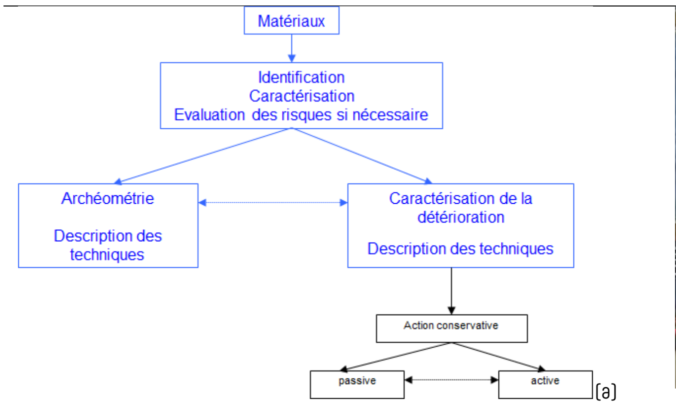
Le LRMH a inscrit son action dans 3 groupes de travail :

- WP2, par la direction d'une tâche sur la mise au point d'un code de bonnes pratiques sur le suivi ou « monitoring » des matériaux du patrimoine bâti ;
- WP3, sous la forme de cours théoriques et pratiques sur la recherche et la conservation ;
- WP9, avec le développement d'un système térahertz-TDS (Spectroscopie dans le domaine temporel dans la gamme térahertz).

Concernant la première tâche, la mission du LRMH était de coordonner les travaux permettant la définition de méthodologies pour l'analyse des matériaux du patrimoine immobilier. Une phase de concertation avec les différents partenaires a permis la définition des matériaux sur lesquels un grand nombre d'experts européens pouvait confronter leur expérience et mettre ainsi au point une méthodologie commune. Quatre grands groupes de matériaux ou de typologie d'œuvre sont donc pu être identifiés :

- pierre/béton/mortier ;
- métal ;
- vitrail ;
- peintures murales/pigments/grottes ornées.

Des groupes de travail regroupant les experts en science de la conservation de ces matériaux ont alors été créés. Pour ces différents matériaux, la méthodologie est la même, comme illustré figure 1a, en partant du matériau avec une première analyse contextuelle pour ensuite différencier l'analyse en deux parties, d'une part l'archéométrie et d'autre part la caractérisation de la détérioration. La validation des procédures mises en place s'est déroulée à Chaalis (Oise, 60) avec les différents partenaires, dans la chapelle Sainte-Marie, avec des études de cas concrets de problématique de conservation et d'archéométrie, comme illustré sur la figure 121.



(a)


(b)

Figure 121 : a) schéma directeur des procédures de bonne pratiques d'analyses des matériaux du patrimoine, b) photo de la réunion permettant la validation in situ des procédures mises en place, dans la chapelle Sainte-Marie, Chaalis (60), France.

Les agents du LRMH ont pris également part aux activités de diffusion de l'excellence scientifique par l'intermédiaire de cours :

- trois sessions de cours sur la conservation de la pierre, à Lisbonne, Torun et Amsterdam ;
- une session sur l'utilisation des techniques d'analyse par laser (LIBS pour le LRMH) dans le patrimoine, à Heraklion.

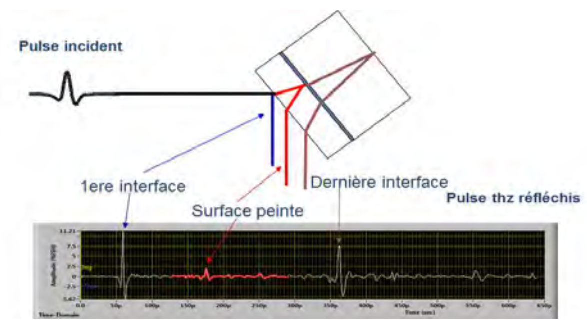
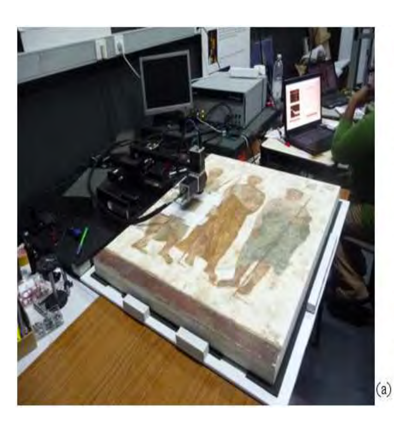


Figure 122 Figure 2: principe du fonctionnement d'un système THz-TDS.

Enfin, le LRMH s'est également inscrit dans un programme de recherche et développement, avec le développement d'un système THz-TDS. Le principe de fonctionnement du système est illustré figure 2. Le système térahertz, non destructif, permet une visualisation de sous-couches du fait d'une réflexion différenciée en temps de l'onde térahertz émise. Le retard de l'écho dépend des propriétés optiques des matériaux rencontrés et de leur profondeur. Ce système permet également une spectroscopie térahertz. Cependant une base de données doit être établie pour permettre une reconnaissance des éléments constituants les échantillons inspectés.

La validation du système, développé au sein du C2RMF par Bianca Jackson, a pu être réalisée aussi bien en laboratoire que sur le terrain, comme illustré sur la figure 123. Les résultats obtenus lors des campagnes effectuées démontrent tout le potentiel de cette technique pour la peinture murale, avec, par exemple, la détection de figures cachées sur le tableau *Les trois hommes armés de lances* ou encore de la possible présence de sinopia à Villeneuve-lez-Avignon. Une convention avec l'université de Reading, précurseur dans le domaine des térahertz, va voir le jour et permettra au LRMH de renforcer son action dans ce domaine.


(a)


(b)

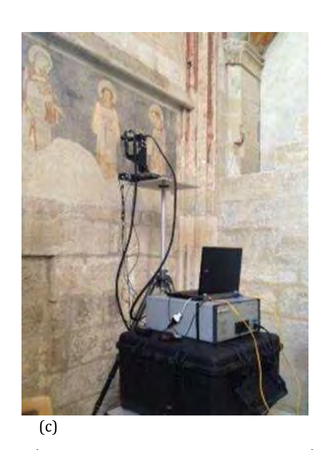

(c)

Figure 123 : photographie du dispositif expérimental et d'œuvres étudiées : a) Les trois hommes armés de lances, collection Campana, Louvre (b) Église Saint-Thomas, Salisbury (Royaume-Uni), (c) chapelle des fresques, Villeneuve-lez-Avignon, France.

Collaboration : Università degli Studi di Perugia (UNIPG), (coordinateur), Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Foundation for Research and Technology - Hellas (FORTH), The National Gallery London (NGL), société civile Synchrotron Soleil (SOLEIL), Consiglio nazionale delle ricerche (CNR- ICVBC/ IFAC/INO), Uniwersytet Mikolaja Kopernika w Toruniu (NCU), Rheinisch-Westphälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Magyar Tudomanyos Akademia Atommagkutato Intezte (ATOMKI-HAS), The British Museum (BM), Doerner Institut - Bayerische Staatsgemäldesammlungen (DI-BS), Doerner Institut - Bayerische Staatsgemäldesammlungen (DI-BS), DE, Idryma Ormylia - Art Diagnosis Centre (Of-ADC), Opificio delle Pietre Dure (OPD), Museo Nacional del Prado (PRADO), Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (OCW-RCE), Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (KIK-IRPA), Agenzia per la Promozione della Ricerca Europea (APRE), Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Budapest Neutron Centrum, Wigner Fizikai Kutatóközpont - Magyar Tudományos Akadémia (BNC-WIGNER), Alma Mater Studiorum, Università di Bologna (UNIBO), Centre de recherche et de restauration des musées de France (MCC-C2RMF).

Personnel permanent : Isabelle Pallot-Frossard (responsable), Élisabeth Marie-Victoire (pôle Béton), Stéphanie Touron (pôle Grottes ornées), Annick Texier (pôle Métal), Vincent Detalle, Dominique Martos-Levif (pôle Peintures murales et polychromie), Ann Bourgès, Jean-Didier Mertz, Véronique Vergès-Belmin (pôle Pierre), Claudine Loisel (pôle Vitrail).

Communication orale avec actes :

Walker G.C., Jackson J.B., Giovannacci D. [...] Detalle V. 2013. Terahertz analysis of stratified wall plaster at buildings of cultural importance across Europe. *In* : Pezzati L., Targoxski P., ed. *SPIE optical metrology, Optics for arts, architecture, and archaeology IV*, *Munich, Germany*, *15-16 May 2013,* Bellingham (Wash.), SPIE, The International society for optical engineering, réf. 8790 0H, p. 1-8.

Giovanacci D., Martos-Levif D., Walker G.C. [...] Detalle V. 2013. Terahertz applications in cultural heritage: case studies. *In* : Veiko V.P., Vartanyan T.A., ed. *International symposium Fundamentals of laser-assisted micro- and nanotechnologies, FLAMN-13*, *Saint-Pétersbourg, Russia, June 24-28 2013,* Bellingham (Wash.), SPIE, The International Society for Optical Engineering, 9065, p. 906510-1-906510-7.

Vallet J.M., Syvilay D., Detalle V., Giovannacci D. *[et al.]*. 2013. Development of a NDT toolbox dedicated to the conservation of wall painting: application to the frescoes chapel in the Charterhouse of Villeneuve-lez-Avignon (France). *In* : *Digital heritage international congress : numérique & patrimoine, Marseille, 28 octobre-1er novembre 2013,* 8 p. Actes à paraître.

Communication orale sans actes :

Giovannacci D., Martos-Levif D., Jackson B., Walker G., Detalle V., Menu M. 2013. Terahertz application to reveal hidden faces on frescoes. *Analyses of paintings: new advances in the development of micro-destructive and non destructive techniques*, *Bologna, Italy, 14th June 2013*.

Financement : 7e programme-cadre pour la recherche et le développement technologique de l'Union Européenne au titre de la convention de subvention No. 283182.

Montant : 112 000 €.

Détection acoustique d'insectes xylophages

Durée : 2010 - 2013

La détection de la présence et de l'activité des larves d'insectes xylophages est indispensable pour déclencher la mise en œuvre d'un traitement insecticide sur les structures en bois ou de mobilier infesté. Les systèmes de détection acoustique disponibles sur le marché sont efficaces pour la détection des capricornes et termites mais sont trop peu sensibles pour d'autres insectes. Ils ne sont pas adaptés par exemple au contrôle d'*Anobium punctatum* (petite vrillette, Fig. 124) ou *Lyctus brunneus.* Des projets se sont succédé depuis dix ans. Ils nous ont conduits à monter une chaîne de mesure dont les caractéristiques techniques ne permettaient pas d'être suffisamment efficace du fait des gammes de fréquences utilisées (20 Hzt à 10 Khz). En effet, les enregistrements obtenus étaient excessivement bruités malgré un traitement du signal. Ce dernier projet avec le laboratoire de la cité de la Musique a permis d'obtenir des résultats prometteurs. Pour cela, une chaîne de mesure enregistrant dans le domaine de fréquences 70-1 000 kHz a été mise en place. Une décomposition en composante principale est obtenue en utilisant les paramètres de densité d'énergie sur des bandes de fréquence différentes sur la totalité des signaux segmentés de vrillettes (avant et pendant traitement par anoxie) et de bruit (signaux segmentés de néons, par exemple). La chaîne de mesures développée pendant cette première étape représente une bonne avancée dans le projet : il est possible de détecter des signaux cohérents et de classifier les signaux de vrillettes des signaux de bruit. De plus, différents couplants ont été essayés (cyclododécane, Paraloid B72) et la pertinence de leur utilisation est démontrée. Une chaîne de mesure est maintenant opérationnelle.



Figure 124 : sculpture polychrome altérée par Oligomerus ptilinoides.

Collaboration : laboratoire du musée de la Musique (Sandy Leconte).

Personnel permanent : Dominique De Reyer, Emmanuel Maurin.

Financement : subvention LRMH.

Montant : 30 000 €.

Développements des techniques d'identification de micro-organismes par LIBS

Durée : 2012-2014

La spectroscopie d'émission optique sur plasma induit par laser (LIBS) est une technique d'analyse élémentaire rapide, sans prélèvement ni préparation d'échantillon. Des premiers essais dans le domaine de la microbiologie ont donné des résultats intéressants et l'objectif de l'étude est de développer un nouveau mode d'identification des micro-organismes présents sur les matériaux du patrimoine par cette technique.

La première année a permis de définir la méthodologie la plus pertinente pour analyser la matrice biologique. Ces premiers essais ont été réalisés en collaboration avec le Laboratoire de spectrométrie ionique et moléculaire (LASIM) de l'université de Lyon I Claude Bernard.

Des préparations biologiques ont été effectuées en laboratoire de microbiologie à l'aide de micro-organismes très communs de l'environnement et souvent retrouvés lors de campagnes de prélèvement sur les patrimoines bâtis et muséal. C'est pourquoi, il a été choisi de travailler avec des bactéries comme *Pseudomonas sp* et *Bacillus sp*. Les solutions bactériennes ainsi cultivées ont été préparées à des concentrations différentes, puis déposées sous forme de goutte sur une lame en verre et enfin, séchées. Ces préparations ont alors été soumises au tir laser en vue d'être analysées pour permettre la réalisation d'une cartographie élémentaire par l'intermédiaire des éléments chimiques tels que le calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, phosphate, silice, titane, et aluminium.

Ces résultats très intéressants sur la spéciation des bactéries ont permis la deuxième année de s'intéresser à l'aspect matériau contaminé. En effet, la biodétérioration des matériaux du patrimoine (pierre, peintures murales, bois, vitrail…) par des micro-organismes tels que des bactéries, des champignons, des algues et des lichens provoque des modifications esthétiques, des altérations chimiques et physiques des matériaux.

De ce fait, nous avons utilisé le protocole standardisé lors de la première année de travaux, en remplaçant la lame de verre par des matériaux plus complexes comme la pierre afin de déterminer la possibilité de séparer le signal des préparations biologiques du signal du matériau.

Les analyses ainsi réalisées au LASIM ont mis en exergue le potentiel de cette technique d'analyse, car il a été possible de discriminer plusieurs types de bactéries sur du marbre. Ces résultats très prometteurs ont été présentés à un colloque international en septembre 2013 à Bari (Italie) « Identification of Microorganisms by LIBS and Application to Cultural Heritage Preservation » (Alexandre François, Vincent Detalle, Geneviève Orial, Vincent Motto-Ros, Jin Yu).

En complément, le couplage récent d'un système Raman et d'un spectrophotomètre spécifique au soufre et au phosphore sur le système LIBS va permettre en fin d'année 2014 d'améliorer la spéciation des bactéries et de commencer à travailler sur les micro-organismes eucaryotes.

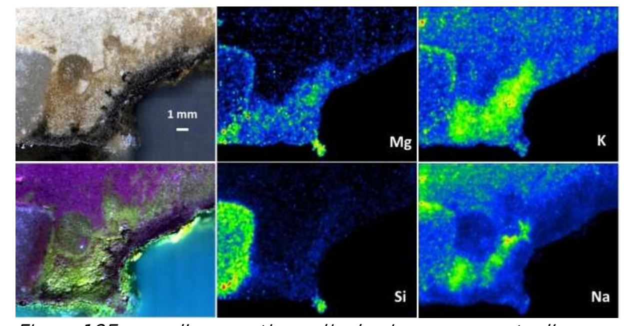


Figure 125 : vue d'une section polie de pierre recouverte d'un lichen. A) Lumière naturelle. B) Lumière fluorescente. CDEF) Cartographie LIBS élémentaire.

Collaboration : Laboratoire de spectrométrie ionique et moléculaire (LASIM), Université de Lyon I Claude Bernard (Vincent Motto-Ros et Jin Yu).

Personnel permanent : Alexandre François, Geneviève Orial et Vincent Detalle.

Communication orale sans acte :
François A., Detalle V., Orial G. *[et al.]*. 2013. Identification of microorganisms by LIBS and application to cultural heritage preservation. *EMSLIBS 2013: 7th Euro-mediterranean symposium on laser induced breakdown spectroscopy, Bari, Italy, 16-20 September 2013*, résumé ref. O-40.

Financement : subvention LRMH.

Montant : 10 000 €.

Évaluation des techniques LIBS LIF RAMAN pour l'analyse des matériaux du patrimoine

Durée : février 2013 - février 2016

Le sujet de cette recherche a pour but de continuer le travail engagé en s'appuyant sur l'EquipEx-Patrimex dont l'un des objectifs est de se doter de nouveaux instruments analytiques de terrain qui seront, à terme, présent dans un laboratoire mobile. Dans ce cadre, il est prévu de développer un système LIBS/LIF/RAMAN portable. En effet ces techniques analytiques ont en commun d'utiliser une source laser en excitation et de détecter le résultat de l'interaction laser-matière. Intégrer ces trois techniques en une seule instrumentation est donc tout à fait envisageable. Les **coupler présente l'intérêt** d'obtenir **sur une même zone,** une analyse **élémentaire** et une analyse **structurale, inorganique et organique**, informations indispensables dans le cas des matériaux complexes du patrimoine.

La première étape de ce développement est envisagée dans ce travail de doctorat. Il s'agit de déterminer, d'optimiser les conditions de mises en œuvre des différentes techniques (longueur d'onde laser, énergie, caractéristiques de collection, domaine spectrale pertinent …) sur la base de deux thématiques représentatives des besoins du patrimoine.

Tout d'abord, la première s'inscrit dans la continuité de l'étude des peintures murales. Il s'agit de caractériser les pigments, les liants de peinture murale et les anciens produits de conservation (polymères). On évaluera notamment la possibilité de réaliser du Raman pulsé et on déterminera les conditions de mise en œuvre de la fluorescence induite par laser résolue en temps pour affiner et obtenir une analyse aussi complète que possible.

La seconde concerne les alliages cuivreux. Les sculptures en cuivre et alliages de cuivre exposées en extérieur développent des altérations de surface en rapport avec la géométrie de l'œuvre, ses conditions d'exposition et la nature de l'alliage (cuivre- laiton –bronze).

Lors des opérations de restauration ou des opérations d'entretien de ces œuvres, un traitement de protection peut être appliqué sur la surface afin d'en assurer la stabilité en limitant les interactions avec l'environnement ou comme anti-graffiti puisqu'elles sont aussi la cible des graffiteurs.

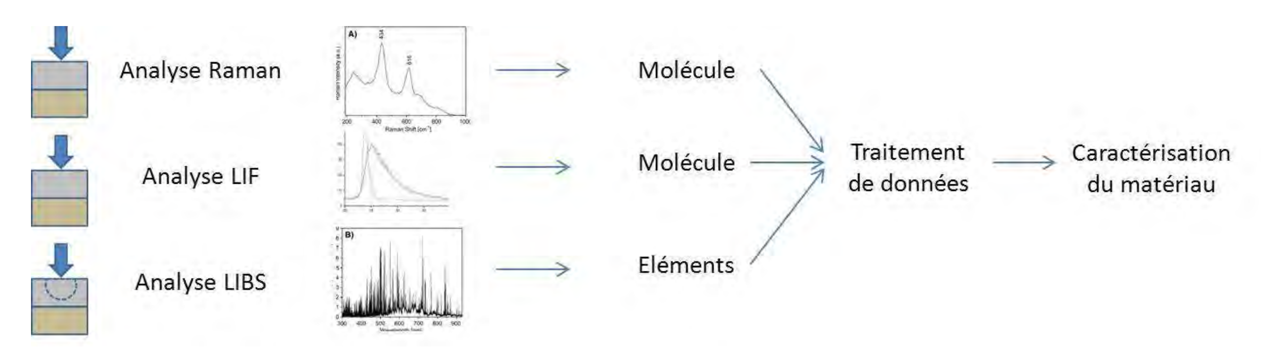


Figure 126 : stratégie analytique.

Collaboration : université de Cergy-Pontoise (Nicolas Wilkie-Chancelier, Loic Martinez, Stéphane Serfaty).

Doctorante : Delphine Syvilay.

Personnel permanent : Vincent Detalle, Annick Texier.

Financement : LRMH-Université de Cergy Pontoise.

Montant : 105 000 €.

PatrimEx (ÉquipEx)

Le LRMH a été à l'initiative en 2012 de l'EquipEx (EQUIPement d'EXcellence) PATRIMEX avec les universités de Cergy-Pontoise et de Versailles/Saint-Quentin, le CRC et le C2RMF. Cet équipement d'excellence bénéficie d'une dotation de 6,5 millions d'euros dans le cadre des investissements d'avenir. PATRIMEX est une plateforme multi-site dédié à la science de la conservation du patrimoine matériel sous toutes ses formes. Cet équipement est étroitement relié au LabEx PATRIMA, constitué d'un réseau croisant les sciences humaines et sociales, et les sciences de l'ingénieur, avec pour triple objectif de mieux :

- appréhender les caractéristiques à la fois physiques, historiques et culturelles des matériaux composant le patrimoine culturel ;
- comprendre l'influence de l'environnement sur ces objets ;
- connaître les techniques de restauration anciennes et en élaborer de nouvelles, avec des matériaux innovants et des méthodes moins invasives.

La création et le développement de 3 plates-formes instrumentales permettra de répondre à certains de ces objectifs ambitieux. La première est une nouvelle ligne de tomographie au sein du synchrotron soleil (ligne PUMA), la deuxième consiste en un développement d'une nouvelle plateforme laser sur le site de l'université de Cergy-Pontoise, et enfin la dernière se sépare en deux éléments, d'une part un laboratoire mobile et d'autre part différents systèmes portables non intrusifs d'analyse des matériaux.

La dernière plate-forme est placée sous la direction du LRMH et est réalisée en collaboration étroite avec le C2RMF et le CRC (équipe CRCC), pour un budget total de 720 k€.

Le CRC prend en charge l'achat d'un système d'analyse hyperspectrale. Le programme a permis l'acquisition d'une partie du matériel. Une première campagne à l'Assemblée nationale sur le *Codex Borbonicus* a été réalisée en septembre 2014.

Le C2RMF, en étroite collaboration avec le LRMH (pôles Pierre et Peintures murales et polychromie), développe un prototype portable et non invasif d'analyses couplées par diffraction des rayons X et fluorescence X (pour un budget de 100 k€). Après une phase de définition mutuelle des besoins, notamment en termes d'encombrement et de résolution angulaire, puis d'essais expérimentaux réalisés avec différentes sources et différents capteurs, un cahier des charges commun a pu être rédigé. Parmi les composants essentiels, le choix de la source de rayons X s'est porté sur une source Cu de la société IFG et le détecteur S70 de la société imXPAD. Ainsi, la source et les différents capteurs sont acquis ou en cours d'acquisition. Le montage final du prototype sera réalisé en sous-traitance par un intervenant extérieur afin de s'assurer de la conformité du système à la norme NF-C 74-100. Le système global devrait être opérationnel au printemps 2015.

Au sein du LRMH, un groupe de travail réunissant des membres des pôles Documentation, Microbiologie, Peintures murales et polychromie, et Pierre a permis la réalisation d'un cahier des charges pour le véhicule laboratoire. L'aménagement du véhicule (modèle Crafter Volkswagen) a été réalisé par un constructeur carrossier (société Durisotti). Celui-ci a été livré en février 2014. Il ne nécessite pas un permis spécial, et a, d'ores et déjà, été utilisé sur le terrain, comme illustré ci-dessous (Fig. 127).



En parallèle, le laboratoire s'est engagé dans le développement de différents outils de diagnostic non intrusifs et de restauration. Cette activité nécessitera la création d'une salle d'optique en 2015.

De façon concomitante, une étude de marché, puis l'écriture de différents cahiers des charges a permis l'acquisition, fin d'été 2014, des éléments constitutifs de lignes d'analyse spectroscopique ; ces éléments sont : (Fig. 128) :

- deux sources excitatrices lasers Nd:YAG, la première à 1064 nm pour une énergie de 100 mJ avec un atténuateur, et la seconde à 266 nm pour une énergie

de 50 mJ avec la possibilité d'utilisation des résiduels à 532 nm et 1064 nm ;

- une chaîne d'acquisition permettant des mesures de fluorescence résolue en temps, par l'intermédiaire d'un détecteur de mesure de déclin de luminescence (gamme spectrale 250-850 nm) ; pour les lignes LIBS et Raman ; un détecteur multicanal CCD, avec un domaine spectral de 220-1050 nm (pour un coût de 45,6 k€) ;
- différents éléments d'optique, de petite électronique et d'informatique permettant l'assemblage et le fonctionnement de ces deux derniers éléments, pour un montant de 20,9 k€.

L'implémentation du contrôle commande de l'ensemble des lignes est en cours de validation, pour être opérationnel fin 2014. Une caméra ICCD, sensible sur une gamme angulaire de 180-920 nm, devra être acquise début 2015 ainsi que différents petits spectromètres, pour un budget proche de 60 k€.

Associée à l'ensemble de la conception de la plate-forme, une thèse de doctorat, menée par Delphine Syvilay, est engagée depuis 2013. Elle a pour but la caractérisation des matériaux par les techniques LIBS, LIF et Raman (cf. p. 127)

Concernant le laser de nettoyage, outil également intégré à l'EquipEx une thèse de doctorat a démarré en novembre 2014 sur le sujet. Cette thèse, menée par Marie Godet, prendra appui sur les connaissances acquises au cours du programme JAPILA. La définition de la/des longueur(s) d'ondes optimale(s) est en cours.

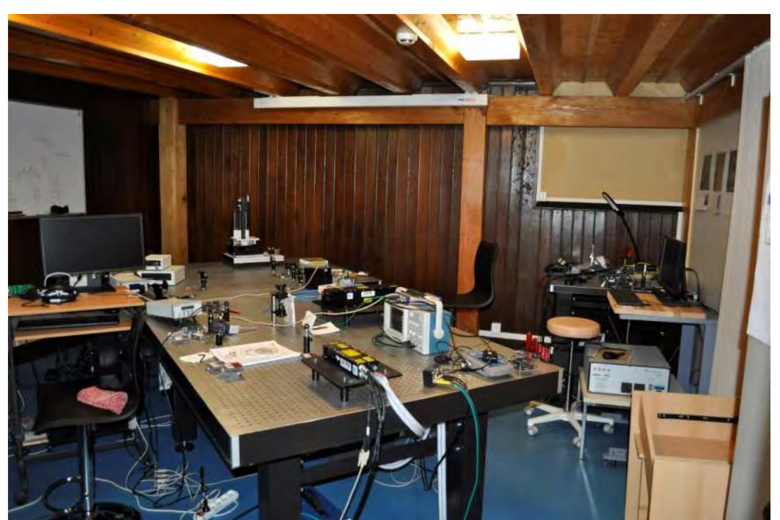


Figure 128 : photo de la salle d'optique.

Collaboration : Fondation des sciences du patrimoine, universités de Cergy-Pontoise et de Versailles-Saint-Quentin, C2RMF, Ipanéma.

Personnel permanent : Vincent Detalle (responsable du projet), David Giovannacci, Didier Brissaud, Dominique Martos-Levif, Barbara Trichereau, Mikaël Guiavarc'h, Jean-Didier Mertz, Véronique Vergès-Belmin, Alexandre François, Olivier Malavergne.

Doctorante : Delphine Syvilay.

Financement : Investissements d'avenir du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche.

Montant : 1,2 million d'euros.

Radiométrie photothermique appliquée à la détection et à la caractérisation d’altérations structurales de peintures murales du patrimoine

Durée : 2012-2015

La thermographie infrarouge stimulée repose sur l’analyse à l’aide d’une caméra thermique de la réponse en température ou en flux d’un échantillon préalablement excité à l’aide d’une source de chaleur contrôlée. La présence de défauts se traduit par l’apparition au cours du temps de zones d’échauffements localisés. L’analyse de la cinétique d’échauffement et de refroidissement de ces zones d’anomalie permet de caractériser ces défauts (profondeur des défauts, etc.)

L’objectif est de mettre à disposition des équipes de restauration du patrimoine un certain nombre de techniques et de traitements de contrôle non destructif reposant sur la thermographie infrarouge stimulée (radiométrie photothermique) qui permettront la détection et la caractérisation des défauts présents dans les œuvres.

L’une des difficultés rencontrée au cours de nos travaux est la sensibilité différentielle des pigments constituant la couche picturale étudiée, au flux excitateur. Cette différence de sensibilité découlant des propriétés radiatives spécifiques des pigments, pouvait conduire à des analyses incomplètes ou imparfaites des œuvres d’art se manifestant sous la forme du motif apparaissant en sur-impression sur le thermogramme. Le travail réalisé vise à corriger partiellement ces effets optiques. Pour cela, nous avons étudié les propriétés radiatives d’un grand nombre de type de couches picturales en mesurant leurs absorptivités spectrales hémisphériques directionnelles.

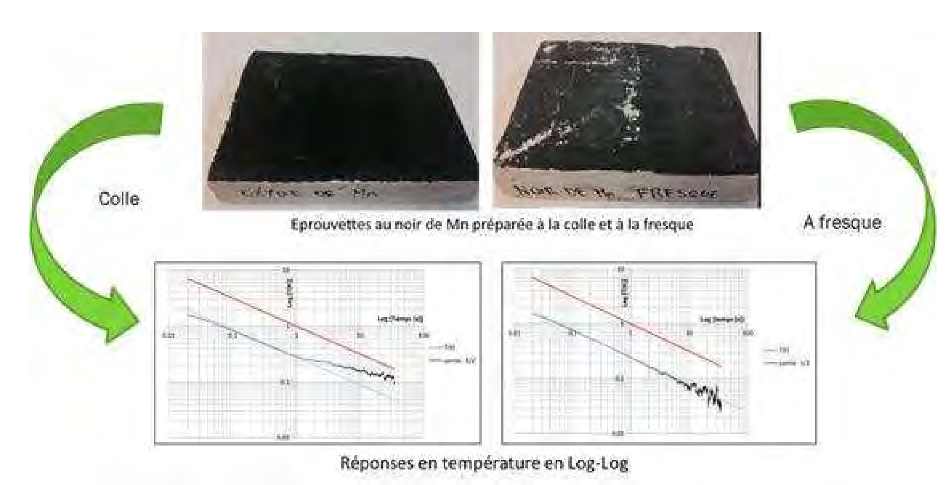


Figure 129: mesures comparées sur des plaquettes à fresque

Cette étude effectuée à l’aide d’un spectroradiomètre à large bande a montré l’existence de bandes spectrales dans lesquelles les différentes couches picturales avaient des propriétés radiatives très proches. Nous avons alors conçu et réalisé un dispositif de thermographie infrarouge stimulée permettant une analyse photothermique dans ces bandes spectrales privilégiées. L’analyse photothermique comparative d’une copie partielle du saint Christophe de la collection Campana du Louvre montre le potentiel de cette nouvelle instrumentation.

Collaboration : Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine (CICRP) (Jean-Marc Vallet), université de Reims Champagne-Ardenne (Jean-Luc Bodnar). École doctorale Sciences Technologie Santé Reims-Picardie.

Doctorant : Kamel Mouhoubi.

Personnel permanent : Vincent Detalle.

Financement : LRMH-CICRP-Région Champagne-Ardenne.

Montant : 105 000 €

REDMONEST - Monitoring dynamic network for existing structures of concrete cultural heritage

Durée : mars 2014 – mars 2017 / Participation Française : mars 2014 – mars 2016

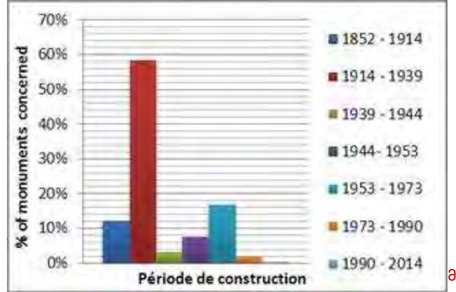


En 2013, le ministère de la Culture et de la Communication français, au travers de son Programme national de recherche sur la connaissance et la conservation des matériaux du patrimoine culturel (PNRCC), s'est associé à l'Initiative européenne de programmation conjointe de la recherche « Patrimoine culturel et changement global : un nouveau défi pour l'Europe » (JPI – JHEP), dans l'objectif de financer à l'échelle européenne des projets de recherche dédiés au patrimoine culturel. Le projet REDMONEST a été l'un des lauréats de cette initiative. L'ambition du projet est de développer un nouvel outil de gestion du patrimoine en béton armé, en se fondant sur une évaluation de l'état d'altération et des conditions environnementales et sociétales associées, afin de définir des stratégies d'entretien ou de conservation adaptées. Cet outil s'intégrera dans une démarche globale de monitoring, associée à un développement de systèmes d'analyse de données et de modèles prévisionnels de durée de vie. Un intérêt particulier sera apporté aux processus de corrosion de ces bétons anciens exposés à un vieillissement naturel (incluant différents mécanismes d'altération, tels que la carbonatation, la corrosion induite par les chlorures ou l'impact du climat), mais aussi à de nouvelles pistes de traitement de conservation (hydrofuges de surface…).

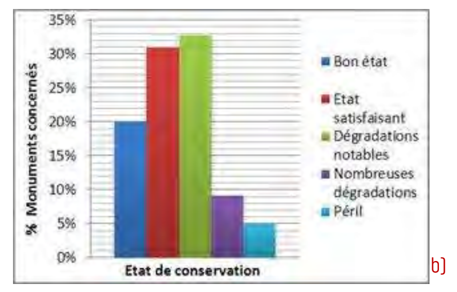
Le projet s'articule autour de quatre principaux objectifs :

- établir un inventaire du patrimoine culturel en béton, dans les pays partenaires du projet ;
- identifier les principaux mécanismes de dégradation affectant ces monuments et établir des indicateurs de performance permettant d'optimiser la gestion de leur entretien/conservation ;
- développer des capteurs d'alerte à introduire dans le béton de façon à pouvoir assurer un monitoring en continu
- combiner les résultats de ces capteurs d'alerte avec un système d'exploitation (EWS : early warning systems, Fig. 130b), afin de développer un outil de gestion adapté à la conservation de ce patrimoine en béton armé.

La première étape du projet a consisté à réaliser un inventaire des constructions en béton à caractère patrimonial (protection régionale, nationale, internationale…) dans les 3 pays partenaires du projet : la France, la Belgique et l'Espagne. Cet inventaire a été réalisé (Fig. 130a) tout d'abord par le biais de l'exploration des données existantes (recherche documentaire, bases de données…). Dans le même temps, des formulaires multilingues interactifs ont été élaborés et soumis, pour la France, à un panel de 169 acteurs du secteur (architectes, conservateurs…). Cette dernière enquête a apporté de nombreuses informations complémentaires sur l'état de conservation du patrimoine recensé (Fig. 130b), mais aussi sur les attentes des gestionnaires en termes de formation, d'information ou d'outils de gestion.



a)



b)

Figure 130 : premiers résultats de l'enquête menee en France, en termes de période de construction et d'état sanitaire.

Collaboration : IETCC (Leader) (Eduardo Torroja), Institute for Construction Science, Madrid, Spain; CSTC-WTCB-BBRI : Belgian Building Research Institute, Limelette, Belgium; ULg : University of Liège (ULg - Dpt ArGEnCo, GeMMe Sector – Construction Materials), Liège, Belgium; Cercle des partenaires du patrimoine (CPP).

Personnel permanent : Élisabeth Marie-Victoire, Myriam Bouichou.

CDD : Teddy Congar (avril-novembre 2014).

Communication orale sans actes :

Marie-Victoire É. 2014. REDMONEST : monitoring dynamic network for existing structures of concrete cultural heritage. *COLLABORATE: cultural heritage research in focus, Joint programming initiative on cultural heritage (JPICH), Heritage Council of Ireland, Dublin, October 29, 2014.*

Financement : JPI-CH

Montant : 80 000€

SAMIA - Stone Ageing Monitoring and Imaging by Acoustics

Durée : septembre 2013 – septembre 2016

Le marbre de Carrare est le matériau le plus présent dans la statuaire du parc du château de Versailles. Cependant son altération est telle que les gestionnaires doivent régulièrement mettre les statues originales à l'abri. Les pathologies rencontrées sont de trois types : érosion superficielle avec perte spontanée de cristaux de marbre, appelée sur place " érosion saccharoïde ", désagrégation granulaire profonde et fissuration. Les critères déterminant la mise à l'abri sont majoritairement basés sur une estimation des cinétiques d'altération.

L'équipe en charge du suivi de la statuaire évalue empiriquement cette cinétique par des observations à l'œil nu, à la loupe binoculaire, ainsi que par des macrophotographies et très occasionnellement par des mesures de vitesse du son. Ces outils ne sont cependant pas suffisants pour, d'une part évaluer précisément et de façon spatialement résolue la perte de cohésion interne, dont on sait qu'elle peut être très forte malgré un état de surface correct, et d'autre part, pour mesurer rapidement et précisément des évolutions minimes mais constantes des états de surface.

Mené avec les conservateurs et les restaurateurs du château de Versailles en collaboration avec les laboratoires SATIE, GEC, et LRMH, le projet SAMIA contribue à répondre à ces questions en développant, en parallèle et en comparaison avec des méthodes existantes, des méthodes non destructives d'évaluation des états de surface et de profondeur du marbre. La méthodologie suivie consiste à sélectionner puis caractériser des éléments de marbre de forme géométrique sans valeur historique/artistique, en l'occurrence des plinthes de piédestaux de statues vieillis naturellement dans le parc (Fig. 131), puis à reproduire ces états par des vieillissements accélérés adaptés. Dans une troisième phase plusieurs outils diagnostiques seront mis en œuvre en laboratoire sur marbre artificiellement vieilli. Nous utiliserons la vibrométrie laser par ondes acoustiques (de volume, de surface et de fissure) afin de modéliser les comportements mécaniques des marbres vieillis. Enfin dans une quatrième étape, des tests seront réalisés *in situ* sur quelques œuvres sélectionnées, en fonction de leur état d'altération.

Au cours de la première année de ce projet, un travail bibliographique a été effectué afin de discerner les différents processus d'altération de ces matériaux ainsi que les méthodes d'investigations non destructives. Pour réaliser l'étude des blocs de marbre par ondes acoustiques à une autre échelle (longueur d'onde de l'ordre du millimètre), il faut nécessairement monter en fréquence. Un système de mesure à deux transducteurs ultrasonores a donc été utilisé dans un premier temps avec un émetteur et un récepteur fonctionnant à 1MHz de fréquence centrale. Les résultats ont permis de déterminer les vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales dans un bloc de marbre sain grâce aux mesures de temps de vol (Fig. 132) : vitesse longitudinale Vp=6350 m/s et vitesse transversale Vs=3350 m/s pour le marbre étudié. Ces informations confirment le potentiel du système instrumental mis en place puisque ces valeurs de vitesses sont conformes à celles citées dans la littérature.

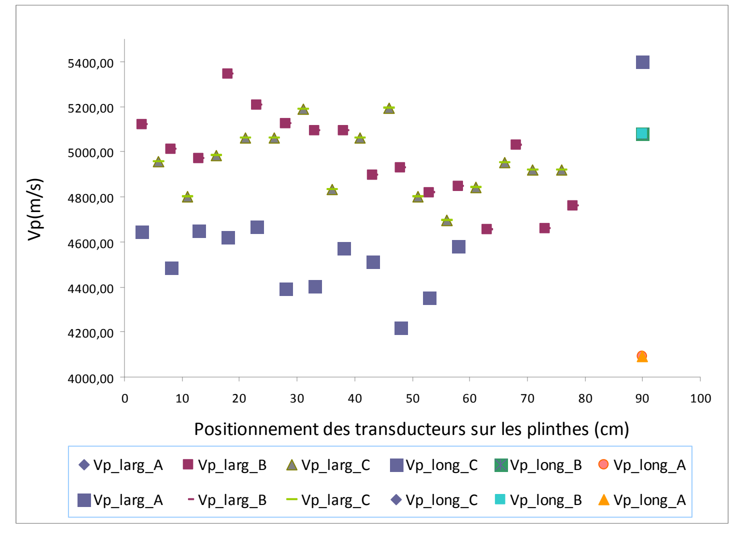




Figure 131 : à gauche : résultats des mesures de vitesse du son (à 60 kHz) sur trois plinthes en marbre de Carrare de la statuaire du parc de Versailles. La plinthe référencée A présente à la fois une érosion saccharoïde (photo de droite), et des valeurs de vitesse du son significativement plus faibles (losanges bleus).

Dans un deuxième temps, un système de détection laser (vibrométrie) a été mis en œuvre pour suivre les ondes au cours de leur propagation. Ce second système permettra d'obtenir des signaux dont on pourra extraire, grâce à un traitement de signal approprié, les paramètres spatiaux et fréquentiels nécessaires à la caractérisation de la dégradation.

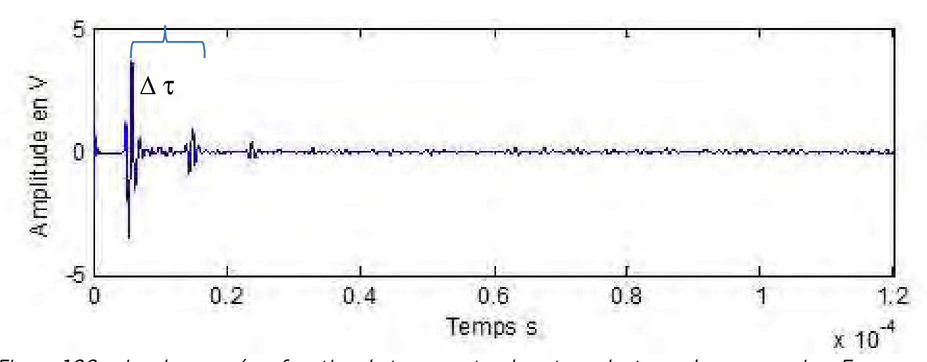


Figure 132 : signal propagé en fonction du temps entre deux transducteurs de compression. En mesurant l'intervalle de temps $\Delta\tau$ entre deux paquets de signal, on peut déterminer la vitesse de propagation de l'onde. L'échantillon testé est une plinthe référencée M3, épaisse de 29 mm.

Collaboration : laboratoire SATIE UMR CNRS 8029 (Loïc Martinez (directeur de thèse) et Nicolas Wilkie Chancelier), Laboratoire de géosciences et environnement, Université de Cergy-Pontoise (Ronan Hébert).

Personnel permanent : Véronique Vergès-Belmin, Jean-Didier Mertz.

Doctorant : Mohamed El Boudani.

Financement : LabEx PATRIMA.

Montant : 127.000 €.

3.2.4 Gestion et traitement des données

PARCOURS (PAtrimoine culturel et Restauration-Conservation : Ontologie pour l'Usage d'un Référentiel commun aux différentes Sources de données)

Durée : octobre 2013 - octobre 2015

Ce programme de recherche a pour objectif principal de fournir un point de référence commun pour des sources d'information du patrimoine divergentes et incompatibles qui peuvent être ainsi comparées, harmonisées et interopérables. Ce système d'information doit permettre une interrogation unifiée des sources sur les métadonnées et sur la similarité de contenu simultanément ou non. La démarche adoptée pour atteindre cet objectif doit permettre l'élaboration d'une ontologie pour les données de conservation-restauration puis l'intégration des sources de données en utilisant cette ontologie. Pour réaliser ce travail d'ingénierie des connaissances et d'intégration de données, un post-doctorant a été recruté pour une durée de vingt mois.

Après avoir pris connaissance des travaux préparatoires des différents partenaires impliqués dans le projet, celui-ci a commencé sa mission par une série d'entretiens menés avec des acteurs du domaine de la conservation-restauration. Cette phase préalable d'immersion lui a permis de mieux appréhender le domaine du patrimoine culturel, notamment les travaux relatifs à la conservation et à la restauration des biens culturels. Il a alors délimité la portée de la future ontologie puis défini l'architecture sur laquelle doit reposer sa construction modélisant les travaux scientifiques menés dans le domaine concerné. Cette ontologie fournira par ailleurs les concepts tels qu'ils sont manipulés par les professionnels du domaine : intervention sur le terrain, analyse des œuvres, instrumentation scientifique, altération, matériau, etc.

Sa construction s'appuiera sur l'utilisation d'un modèle ontologique connu dans le domaine du patrimoine, en l'occurrence CIDOC-CRM.

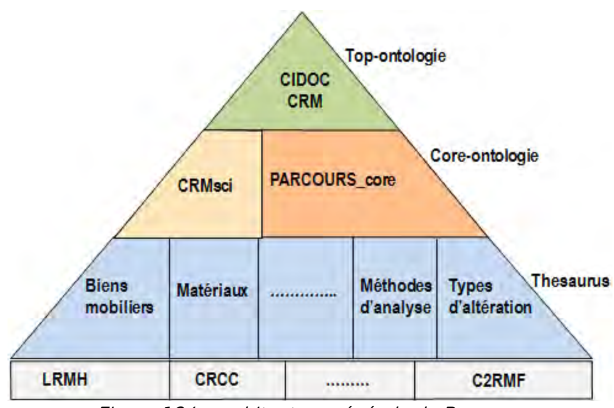


Figure 134 : architecture générale de Parcours.

Comme le montre la figure 133, les ontologies CRMsci et Parcours_core constitueront le cœur de l'architecture PARCOURS et seront par ailleurs des extensions du modèle de référence CIDOC-CRM. CRMsci est une ontologie existante qui sera réutilisée pour la modélisation des données relatives aux analyses scientifiques. Elle sera connectée à l'ontologie Parcours_core qui, elle, sera construite pour modéliser les concepts de base du domaine et pour définir également les relations caractéristiques pour l'utilisation de terminologies contrôlées (Thésaurus). Parcours_core sera centrée sur la notion de bien culturel (FIG. 134) avec une modélisation sur quatre grands axes, que sont : l'identification du bien, sa localisation, ses caractéristiques physiques et l'ensemble des événements qui l'affectent.

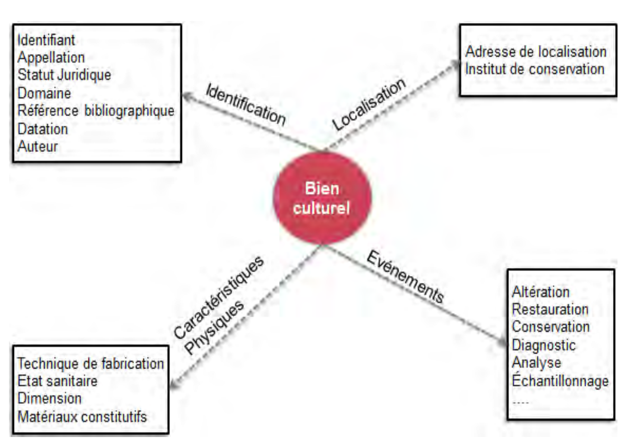


Figure 133 : modélisation de l'ontologie de Parcours_core.

En développant ce modèle, nous avons identifié l'ensemble des thésaurus qui seront nécessaires pour être reliés aux concepts de l'ontologie Parcours_core. Certains de ces thésaurus sont déjà disponibles et fournis dans l'application GINCO du ministère de la Culture et de la Communication, les autres devront être construits en collaboration avec les partenaires du projet et des scientifiques du domaine de la conservation-restauration. En parallèle, le travail de mise en place d'un portail collaboratif (FIG. 135) continue ; il permettra le recueil des données scientifiques de conservation-restauration conformément à l'architecture PARCOURS ainsi que leur partage à travers leur mise en disposition sous forme de silos de données sémantiques ouvertes et liées.



Figure 135 : portail collaboratif d'acquisition des données.

Collaboration : Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), (Luc Bouiller, co-porteur du projet, Claude Darrieumerlou), Équipes traitement de l'information et systèmes (ETIS, Université Cergy-Pontoise/ENSEA/CNRS, UMR 8051), (Dan Vodislav, Claudia Marinica, Dominique Laurent, Boris Borzic), François Laissus, informaticien conseil.

Personnel permanent : Élise Leboucher, co-porteur du projet, Olivier Malavergne (équipe LRMH) ; Christine Capderou (équipe CRCC).

CDD : Cheikh Niang, post-doctorant (20 mois).

Impact : Journée SHS et sciences de l'information, 31 janvier 2014 : présentation du projet.

Financement : Fondation des sciences du patrimoine (LabEx Patrima).

Montant : 100 000 €.

3.3 Publications

3.3.1 ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées par l'AERES ou dans des bases de données internationales

1. Bernardi A., Favaro M., Nijland T., García O., Detalle V. *[et al.]*. 2012. NANOMATCH: a European project to develop consolidants through the synthesis of new inorganic nanomaterials for the conservation of built heritage. *International journal of heritage in the digital era*, 1(supplément 1) : 307-312.

2. Bernardi A., Becherini F., Verità M., [...] Pallot-Frossard I. 2013. Conservation of stained glass windows with protective glazing: main results from the European VIDRIO research programme. *Journal of cultural heritage*, 14 (6) : 527-536.

3. Bodnar J.L., Mouhoubi K., Di Pallo L., Detalle V. *[et al.]*. 2013. Contribution to the improvement of heritage mural painting non-destructive testing by stimulated infrared thermography. *The European physical journal. Applied physics*, 64 (1) : 11001p1-11001p7.

4. Giovannacci D., Leclaire C., Morgnies M., Ellmer M., Mertz J.D., Orial G., Chen J., Bousta F. 2013. Algal colonization kinetics on roofing and façade tiles: influence of physical parameters. *Construction and building materials*, 48 : 670-676.

5. Lombardo T., Gentaz L., Verney-Carron A., Chabas A., Loisel C. *[et al.]*. 2013. Characterization of complex alteration layers in medieval glasses. *Corrosion science*, 72 : 10-19.

6. Tornari V., Bernikola E., Tsiranidou E., Hatzigiannakis K., Andrianakis M., Detalle V., Bodnar J.L. 2013. Micro-mapping of defect structural micro-morphology in the documentation of fresco wallpaintings. *International journal of heritage in the digital era*, 2(1) : 1-22.

7. Vercoutère C., Guérin C., Crépin L. [...] Brissaud D. *[et al.]*. 2013. Étude pluridisciplinaire du squelette de rhinocéros laineux, *Coelodonta antiquitatis* (Blumenbach, 1799), de l'Institut de paléontologie humaine (Paris, France). *L'Anthropologie*, 117(1) : 1-47.

8. Borderie F., Alaoui Sehmer L., Bousta F. *[et al.]*. 2014. Cellular and molecular damage caused by night UV-C irradiation of the cave-harvested green alga *Chlorella minutissima*: implications for cave management. *International biodeterioration & biodegradation* , 93 : 118-130.

9. Borderie F., Tête N., Cailhol D., Alaoui-Sehmer L., Bousta F. *[et al.]*. 2014. Factors driving epilithic algal colonization in show caves and new insights into combating biofilm development with UV-C treatments. *Science of the total environment*, 484 : 43-52.

10. Denecker M.F.C., Hebert R.L., Wassermann J., Dosseh G., Menendez B., Bourgès A. 2014. Experimental study of the crystallization of sodium sulfate hydrates through temperature monitoring. *Environmental earth sciences*, DOI 10.1007/s12665-014-3379-2.

11. Kloppmann W., Leroux L., Bromblet P. *[et al.]*. 2014. Tracing medieval and renaissance alabaster works of art back to quarries : a multi-isotope (Sr, S, O) approach. *Archaeometry*, 56(2) : 203-219.

12. Le Conte S., Vaiedelich S., Thomas J.H., De Reyer D., Maurin E. *[et al.]* . 2014. Acoustic emission to detect xylophagous insects in wooden musical instrument. *Journal of cultural heritage*, DOI 10.1016/j.culher.2014.07.001.

13. Mihajlovski A., Seyer D., Benamara H., Bousta F. *[et al.]*. 2014. An overview of techniques for the characterization and quantification of microbial colonization on stone monuments. *Annals of microbiology*, DOI 10.1007/s13213-014-0956-2.

14. Odin G.P., Vanmeert F., Janssens K., Mertz J.D. *[et al.]*. 2014. Accelerated ageing of shales of palaeontological interest : impact of temperature conditions = Vieillissement accéléré de schistes argileux d'intérêt paléontologique : impact des conditions de température. *Annales de Paléontologie*, 100 : 137-149.

3.3.2 ACLN : Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées par l'AERES ou dans des bases de données internationales

15. Hugon P., Martos D. 2013. Étude scientifique des peintures murales de Saint-Savin-sur-Gartempe. *In situ : revue des patrimoines*, 22, [en ligne] http://www.insitu.revues.org.

16. Rouмégoux P., Mertz J.D. 2014. Consolidation d'un grès argileux avec deux types de silicates d'éthyle. *Coré*, 30 : 25-34.

3.3.3 ASCL : Articles dans des revues sans comité de lecture

17. Marie-Victoire É., Quénée B. 2013. Béton et patrimoine. *Travaux*, 898 : 108-112.

18. Pallot-Frossard I, Tugas J., Vingtain D. *[et al.]*. 2013. Les fresques de la chapelle Saint-Martial, palais des Papes, Avignon, Vaucluse. *Monumental*, 2 : 84-91.

19. Pallot-Frossard I. 2013. Petite machine à remonter le temps. *Arts sacrés*, HS 3 : 36-45.

20. Pallot-Frossard I. 2013. Science et conservation du patrimoine, une alliance nécessaire. *Sites & monuments*, 220 : 95-103.

21. Celle S., Vergès-Belmin V., Oliveira C. de. 2014. Programme JAPILA : recherche sur le "jaunissement" des pierres traitées par laser. *La Pierre d'Angle*, 64 : 52-53.

3.3.4 C-INV : Conférences données à l'invitation du comité d'organisation dans un congrès national ou international

22. Loisel C., David V. 2013. L'histoire de la dalle de verre et les problèmes majeurs de conservation restauration. *Mois de l'Art Déco, 9 mars-9 avril 2013*, *Béthune, 21 mars 2013*.

23. Marie-Victoire É., Bouichou M. 2013. Concrete Research and Conservation. *Conserving modern architecture colloquium and expert meeting: Assessing the current state of practice to advance the field, Los Angeles, Getty Institute of Conservation, March 6-7, 2013.*

24. Merckx B., Radimy R.T., Mertz J.D. *[et al.]*. 2013. Mesure de conductivité thermique en surface par la méthode du fil chaud : application au bâti ancien et aux sols argileux. *38e journée du Groupe francophone d'umidimétrie et transfert en milieux poreux (GFHN 2013), ENSIP, Poitiers, 18-21 novembre 2013*

25. Mertz J.D., Colas E. 2013. Les argiles dans la dilatation et le dessalement des pierres du patrimoine bâti. *38e journée du Groupe francophone d'umidimétrie et transfert en milieux poreux (GFHN 2013), ENSIP, Poitiers, 18-21 novembre 2013.*

26. Bousta F. 2014. Altérations biologiques des œuvres d'art. *École thématique CNRS « BIODEMAT 2014 », La Rochelle, 12-17 octobre 2014.*

27. Celle S. 2014. Research laboratory for historical monuments in France: outstanding scientific contributions in the field of heritage conservation. *Outstanding scientific contributions in the field of heritage conservation in France, Historic resources committee of the AIA, San Francisco, 4th November 2014.*

28. Marie-Victoire É. 2014. Carbonation induced corrosion: a main conservation issue. *Conserving concrete heritage: an experts meeting to identify research needs to advance the field, Getty Conservation Institute, Los Angeles, June 9-11, 2014*.

29. Marie-Victoire É. 2014. REDMONEST : monitoring dynamic network for existing structures of concrete cultural heritage. *COLLABORATE: cultural heritage research in focus, Joint programming initiative on cultural heritage (JPICH), Heritage Council of Ireland, Dublin, October 29, 2014.*

30. Touron S., Bousta F. 2014. Les sites ornés et les micro-organismes : gestion et conservation des œuvres. *Journée recherche et industrie sur le « management des ressources microbiennes » ; JRI2014, Narbonne, 7-9 octobre 2014.*

3.3.5 C-ACTI : Communications avec actes dans un congrès international

31. Bonazza A., Natali I., Becherini F., Bianchin S., Bourguignon E. *[et al.]*. 2013. Climate impact and innovative materials for the preservation of built heritage: the EC NANOMATCH project. *In* : Boriani M., Gabaglio R., Gulotta D., eds. *Built heritage 2013 : monitoring conservation management, Milan, Italy, 18-20 November 2013*, Milan : Politecnico di Milano, p. 1368-1375.

32. Bouichou M., Marie-Victoire É., Texier A., Blondiaux T. 2013. How to identify a natural cement: case study of Vassy church, France. *In* : Hugues J.J., ed. *HMC 13: The 3rd historic mortars conference*, *Glasgow, Scotland, University of the West of Scotland, 11-14 September 2013*, 8 p.

33. Bousta F. 2013. Agents responsible for wood decay in historical monuments: identification, treatment and preventive measures. *In* : *Microbial biodeterioration of cultural property : recent topics on the investigation of and countermeasures for biodeterioration of outdoor/indoor properties and disaster-affected objects: The 36st international symposium on the conservation and restoration of cultural property*, *Tokyo, December 5-7, 2012*, Tokyo, National research institute for cultural properties, p. 107-113.

34. Favaro M., Chiurato M., Tomasin P. [...], Orial G., Bourguignon E. *[et al.].* 2013. Alkaline earth alkoxides for conservation treatment of stone and wood in built heritage. *In : Proceedings of 3rd European workshop on cultural heritage preservation (EWCHP2013), Bolzano (Italy), 16th-18th September 2013*, Milan : Felix Verlag ed., p. 105-111.

35. Giovanacci D., Martos-Levif D., Walker G.C. [...] Detalle V. 2013. Terahertz applications in cultural heritage: case studies. *In* : Veiko V.P., Vartanyan T.A., ed. *International symposium Fundamentals of laser-assisted micro- and nanotechnologies, FLAMN-13*, *Saint-Pétersbourg, Russia, June 24-28 2013*, Bellingham (Wash.), SPIE, The International Society for Optical Engineering, 9065, p. 906510-1-906510-7.

36. Grégoire S., Boudinet M., Surma F., Pelascini F., Holl Y., Motto-Ross,V., Duchêne S., Detalle V. 2013. Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) for the characterization of organic materials in mural paintings. *In* : Saunders D., Strlic M., Korenberg C., ed. *Lasers in the conservation of artworks IX. London, 7-10 September 2011*, London, Archetype publ., p. 116-124.

37. Merckx B., Mertz J.D., Dudoignon P., Giovannacci D., Guiavarc'h M. 2013. Influence de la microstructure et de la rugosité de surface sur la détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud. *In* : *XIe colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes*, *3-5 juin 2013, Reims*, 7 p.

38. Orial G. 2013. Investigation on the bio deterioration of cultural properties: overview, preventive measures and recent topics. *In* : *Microbial biodeterioration of cultural property: recent topics on the investigation of and countermeasures for biodeterioration of outdoor/indoor properties and disaster-affected objects: The 36st international symposium on the conservation and restoration of cultural property*, *Tokyo, December 5-7 2012*, Tokyo, National research institute for cultural properties, p. 17-28.

39. Pallot-Frossard I. 2013. The restoration of the stained glass windows from Chartres cathedral. A long story. *In : European cathedrals: conservation of stained-glass windows, Pisa, 30 May 2013*. Pisa, Opera della Primaziale Pisana, 2014, p. 75-87.

40. Perrin É., Vrabie V., Bodnar J.L.. [...] Detalle V. 2013. Contrôle non destructif d'œuvres d'art du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée associée à des statistiques d'ordre supérieur. *In* : *3e congrès international sur l'ingénierie des risques industriels*, *Reims, 3-5 juillet 2013*, 15 p.

41. Saheb M., Mertz J.D., Colas E. *[et al.]*. 2013. Multiscale characterization of limestone used on monuments of cultural heritage. *In* : *2013 MRS Fall meeting & exhibit, Boston, Massachusetts, December 1-6, 2013*, Warrendale (Pennsylvania, EU), Materials research society, vol. 1656, réf. PP3.07, 6 p.

42. Syvilay D., Texier A., Arles A. [...] Detalle V. *[et al.]*. 2013. Trace elements quantification of lead-based roof sheets of an historical monument. *In* : *7th Euro mediterranean symposium on laser induced breakdown spectroscopy, Bari, Italy, 16-20 September 2013*. Actes à paraître.

43. Valageas C., Bouichou M., Marie-Victoire É. *[et al.]*. 2013. History of the natural cement industry in Marseille region, France. *In* : Hugues J.J., ed. *HMC 13: The 3rd historic mortars conference, Glasgow, University of the West of Scotland, 11-14 September 2013*, Glasgow,University of the West of Scotland, 9 p.

44. Valageas C., Bouichou M., Marie-Victoire É. *[et al.]*. 2013. Histoire de l'industrie du ciment naturel dans la région de Marseille. *In* : *RIPAM 5 : 5e rencontres internationales du patrimoine architectural méditerranéen, Marseille, 16-18 octobre 2013,* Marseille, CICRP, p. 162-166.

45. Vallet J.M., Syvilay D., Detalle V., Giovannacci D. *[et al.]*. 2013. Development of a NDT toolbox dedicated to the conservation of wall painting: application to the frescoes chapel in the Charterhouse of Villeneuve-lez-Avignon (France). *In* : *Digital heritage international congress : numérique & patrimoine, Marseille, 28 octobre-1er novembre 2013,* 8 p. Actes à paraître.

46. Venault de Bourleuf É., Loisel C., Bauchau F., Ferrand J., Rossano S., Pallot-Frossard I. 2013. The browning phenomenon on stained-glass windows: characterisation of the degradation layer and evaluation of selected treatments. *In* : Römich H., Van Lookeren Campagne K., ed. *Recent advances in glass, stained-glass, and ceramics conservation: ICOM-CC Glass and ceramics working group interim meeting and forum of the international scientific committee for the conservation of stained glass (Corpus Vitrearum-ICOMOS), Amsterdam, October 2013,* Zwolle (The Netherlands): Spa Uitgevers, p. 191-200.

47. Verney-Carron A., Michelin A., Gentaz L. [...], Loisel C. 2013. Role of the altered layer on the alteration kinetics of medieval stained glasses in atmospheric medium. *In* : *2013 MRS Fall meeting & exhibit, Boston, Massachusetts, December 1-6, 2013*, Warrendale (Pennsylvania, EU), Materials research society, vol. 1656, 12 p.

48. Walker G.C., Jackson J.B., Giovannacci D. [...] Detalle V. 2013. Terahertz analysis of stratified wall plaster at buildings of cultural importance across Europe. *In* : Pezzati L., Targoxski P., ed. *SPIE optical metrology, Optics for arts, architecture, and archaeology IV, Munich, Germany, 15-16 May 2013,* Bellingham (Wash.), SPIE, The International society for optical engineering, réf. 8790 0H, p. 1-8.

49. Warscheid T., Orial G., Bousta F., François A., Pallot-Frossard I. 2013. The prehistoric wall-paintings of Lascaux: managing conservation measures in respect to microbiological monitoring and research. *In* : Danzl T., Exner M., Rüber-Schütte E., eds. *Wallpaintings in crypts, grottoes and catacombs: strategies for the conservation of coated surfaces in damp environments: Internationale Tagung des Deutschen Nationalhomitees von ICOMOS, Quedlinburg (Allemagne), Palais Salfeldt, 3-6 November 2011*, Munich, ICOMOS, Deutsches Nationalkomitee, p. 17-32.

50. Wouters H., Rambaut A., Ligovich G., Lemasson Q., Loisel C. 2013. Stained-glass windows of St Jacobs church, Antwerp, Belgium: an interdisciplinary investigation. *In* : Römich H., Van Lookeren Campagne K., ed. *Recent advances in glass, stained-glass, and ceramics conservation: ICOM-CC Glass and ceramics working group interim meeting and Forum of the international scientific committee for the conservation of stained glass (Corpus Vitrearum-ICOMOS), Amsterdam, October 2013,* Zwolle (The Netherlands), Spa Uitgevers, p. 269-279.

51. Bourgès A., Colas E., Vissac A. *[et al.]*. 2014. Similarities and differences in evaluation methods for stone or earthen surfaces. *In* : *Proceedings of the international conference on conservation of stone and Earthen architectural heritage, Gongju, Republic of Korea,* May 20-23 2014, Gongju, ICOMOS-ISCS, p. 165-171.

52. Bromblet P., Dessandier D., Leroux L. 2014. Les pierres et les autres matériaux de construction de l'église de l'ancien couvent des Grands Carmes, de l'ancienne église Saint-Jean-le-Vieux et de la cathédrale Saint-Jean-Baptiste à Perpignan. *In* : Catafau A., Passarius O., coord. *Un palais dans la ville. Volume 2. Perpignan des rois de Majorque. Ouvrage réunissant les actes du colloque tenu à Perpignan, 20-22 mai 2011,* Canet, ed. Trabucaire, p. 315-330.

53. Detalle V., Mouhoubi K., Syvilay D., Martos D., Trichereau B. *[et al.]*. Pulsed laser: a new way for frescoes identification and caracterization coupling LIBS and stimulated infrared thermography. *In* : Nevin A., Mahgoub H., El-Rifai I., eds. *Lacona X: international conference on lasers in the conservation of artworks: abstracts, Sharjah, United Arab Emirates 9-13 June 2014,* p. 40. Actes à paraître.

54. Geffroy A.M., Texier A. 2014. La protection anti-graffiti de la statuaire métallique en cuivre ou alliage de cuivre exposée en extérieur. *In* : *La sculpture dans la ville : problèmes de conservation et de restauration, Tours, 8 juin 2012.* Tours, Arset, p. 97-120.

55. Hunault M., Bauchau F., Loisel C. *[et al.]* 2014. Reducing manufacturing conditions of medieval blue glass revealed by µ-XANES: abstract. *In* : *Synchrotron radiation and neutrons in art and archaeology conference (SR2A-2014), Paris, 9-12 septembre 2014*. Actes à paraître.

56. Jackson J.B. [...] Detalle V., Giovannacci D. *[et al.]*. 2014. Terahertz pulse investigation of paleolithic etchings. *In* : *39th International conference on infrared, millimeter, and terahertz waves, September 14-19, 2014, The University of Arizona, Tucson, AZ, USA*. Actes à paraître.

57. Marie-Victoire É., Bouteiller V., Schneider J. *[et al.]*. 2014. Influence des conditions de mesure et de la contamination initiale du béton sur les valeurs de résistance de polarisation mesurées avec un Gecor6©. *In* : *Congrès Diagnobéton : auscultation et instrumentation des ouvrages de Génie civil, Toulouse, France 19 & 20 mars 2014. Annales du bâtiment et des travaux publics*, 66 (1-2-3), p. 130-135.

58. Marie-Victoire É., Bouichou M., Bouteiller V., Tong Y.Y. 2014. Realkalisation of a late 19th century bridge. *In :* Grantham M., Basheer P.A.M., Magee B., Soutsos M., ed. *Concrete solutions: proceedings of 5th international conference on concrete repair, Belfast, Northern Ireland, 1-3 September 2014,* Leiden : CRC Press ; Taylor & Francis, p. 369-448.

59. Oliveira C. de, Bromblet P., Colombini A., Vergès-Belmin V. 2014. Medium wave ultraviolet light (UV-B) as a way to eliminate laser-induced yellowing on stone artefacts. *In* : Nevin A., Mahgoub H., El-Rifai I., eds. *Lacona X: international conference on lasers in the conservation of artworks: abstracts*, *Sharjah, United Arab Emirates, 9-13 June 2014*, p. 51. Actes à paraître.

60. Tiennot M., Liégey A., Bourgès A., Mertz J.D. *[et al.]*. 2014. Clays, unbaked earth tablets, and ethyl silicate : towards an understanding of the consolidation mechanisms. *In* : Bridgland J., ed. *ICOM-CC, 17th Triennial conference: preprints, Melbourne, 15-19 September 2014*, Paris, International council of Museums, réf. 0504-405.

61. Valotteau C., Humblot V., Baccile N., Bousta F. 2014. Development of protective biocidial coatings using eco-friendly biosurfactants. *In : European conference on Biodeterioration of stone monument, Université de Cergy-Pontoise, 7 novembre 2014*, actes à paraître.

62. Vergès-Belmin V., Oliveira C. de, Rolland O. 2014. Investigation on yellowing as an effect of laser cleaning at Chartres Cathedral, France. *In* : Bridgland J., ed. *ICOM-CC, 17th Triennial conference: preprints*, *Melbourne, 15-19 September 2014*, Paris, International council of Museums, réf. 1703-426.

63. Vergès-Belmin V., Rolland O., Jourd'heuil I., Guiavarc'h M., Zanini A. 2014. ND:YAG low Q-switched versus short-free running laser cleaning thrials at Chartres cathedral, France. *In* : Nevin A., Mahgoub H., El-Rifai I., eds. *Lacona X: international conference on lasers in the conservation of artworks: abstracts, Sharjah, United Arab Emirates, 9-13 June 2014,* , p. 43-44. Actes à paraître.

64. Vergès-Belmin V., Oliveira C. De, Trichereau B., Detalle V. *[et al]*. 2014. Poultice unyellowing of laser cleaned surfaces at Chartres cathedral (France). *In* : *Improvements in conservation and rehabilitation - Integrated methodologies: 9th International symposium on the conservation of monuments in the Mediterranean Basin, 3-5 Ankara, Turkey, June 2014: abstracts*, p. 74. Actes à paraître.

3.3.6 C-ACTN : Communications avec actes dans un congrès national

65. Detalle V., Loisel C., Texier A., Syvilay D., Marie-Victoire É., Duchêne S., Bouichou M., Giovannacci D. *[et al.]*. 2013. Développement de méthodologies analytiques des matériaux du patrimoine par LIBS (MAPALIBS) = Development of LIBS analytical methodologies for cultural heritage materials characterization: poster. *In :* Max-Colinart S., coord. *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 20 et 21 novembre 2012*, Paris, ministère de la Culture et de la Communication, p. 106.

66. Lombardo T., [...] Loisel C., Neff D., Pallot-Frossard I. 2013. Étude de l'altération atmosphérique des verres de type médiéval = Study of the atmospheric corrosion of medieval-like glasses. *In :* Max-Colinart S., coord. *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 20 et 21 novembre 2012*, Paris, ministère de la Culture et de la Communication, p. 74-78.

67. Mouhoubi K., Bodnar J.L., J. Nicolas L., Detalle V., Vallet J.M., Duvaut T. 2013. Caractérisation thermophysique locale d'œuvres d'art du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée. *In* : *Congrès français de thermique : thermique et contexte incertain, Gérardmer, 28-31 mai 2013*. [en ligne] http://www.sft.asso.fr

68. Mouhoubi K., Bodnar J.L., Pommies M., Detalle V., Vallet J.M., Duvaut T. 2013. Aide à la restauration d'œuvres d'art du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée : contribution à la réduction des effets optiques induits par la couche picturale. *In* : *Congrès français de thermique : thermique et contexte incertain, Gérardmer, 28-31 mai 2013*. [en ligne] http://www.sft.asso.fr

69. Nguyen T.P., [...] Bousta F. [...] Orial G. *[et al.]*. 2013. DECAGRAPH : détection précoce des contaminants des collections graphiques = DECAGRAPH: early detection of biological and chemical contaminants of paper based cultural heritage. *In :* Max-Colinart S., coord. *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 20 et 21 novembre 2012*, Paris, ministère de la Culture et de la Communication, p. 44-49.

70. Touron S., Seron A., Leclaire C., François A. [...] Bousta F., Orial G. 2013. Apport des hydroxydes doubles lamellaires à la conservation de grottes (projet APACH) = Contribution of layered double hydroxides to the conservation of caves (APACH project). *In :* Max-Colinart S., coord. *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 20 et 21 novembre 2012*, Paris, ministère de la Culture et de la Communication, p. 90-94.

71. Venault de Bourleuf É. [...] Loisel C., Bauchau F., Bousta F., Orial G., François A. [...] Pallot-Frossard.I. 2013. Étude du phénomène de brunissement de vitraux médiévaux = The browning phenomenon of medieval stained-glass windows : poster. *In :* Max-Colinart S., coord. *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 20 et 21 novembre 2012*, Paris, ministère de la Culture et de la Communication, p. 115-119.

72. Vissac A., Colas E., Fontaine L., Bourgès A. *[et al.]*. 2013. Protection et conservation du patrimoine architectural en terre par des stabilisants naturels, d'origine animale ou végétale. Interactions argiles/biopolymères (projet PaTerre+) = Protection and conservation of earthen architectural heritage by natural stabilizers, from animal or vegetal origin. Clay/biopolymers interactions (PaTerre+ project): poster. *In :* Max-Colinart S., coord. *Actes du colloque Sciences des matériaux du patrimoine culturel, Paris, Institut national d'histoire de l'art, 20 et 21 novembre 2012*, Paris, ministère de la Culture et de la Communication, p. 135-139.

3.3.7 C-COM : Communications orales sans actes dans un congrès international ou national

73. Blanc A., Leroux L. 2013. Apport de l'identification géologique dans l'étude des monuments. *14e congrès français de sédimentologie*, *Paris, 5-7 novembre 2013*.

74. Büttner S. [...] Leroux L. 2013. Une plateforme numérique mutualiste pour un atlas historique et technique de la pierre à bâtir bourguignonne. *14e congrès français de sédimentologie*, *Paris, 5-7 novembre 2013*.

75. Costa P., Touron S. 2013. Técnicas de conservación y de restauration del arte rupestre y de las rocas esculpidas de origen volcanico. *XIVe coloquio guatemalteco de arte rupestre*, *Guatemala city (Guatemala), Universidad de San Carlos, 2-6 septembre 2013*.

76. Detalle V. 2013. Nouvelle stratégie analytique pour l'identification des matériaux organiques du patrimoine. *Journées LIBS France*, *Lyon, 4-7 juin 2013*.

77. François A., Detalle V., Orial G. *[et al.]*. 2013. Identification of microorganisms by LIBS and application to cultural heritage preservation. *EMSLIBS 2013: 7th Euro-mediterranean symposium on laser induced breakdown spectroscopy, Bari, Italy, 16-20 September 2013*, résumé ref. O-40.

78. Giovannacci D., Martos-Levif D., Jackson B., Walker G., Detalle V., Menu M. 2013. Terahertz application to reveal hidden faces on frescoes. *Analyses of paintings: new advances in the development of micro-destructive and non destructive techniques*, *Bologna, Italy,14th June 2013*.

79. Giovannacci D., Mertz J.M. 2013. Utilisation du traitement de l'image au service du patrimoine. *Conférence MATLAB 2013, retours d'expérience : MATLAB en action*, *Paris, Grand Palais, 11 juin 2013*.

80. Kloppmann W., Leroux L., Le Pogam P.Y. *[et al.].* 2013. Origin of French 14th to 16th century alabaster artwork from Île-de-France assessed through multi-isotope archaeometry (S, O, SR). *10th applied isotope geochemistry conference*, *Budapest, Hungary, 22-27 September.*

81. Leroux L. 2013. Approvisionnement pour la construction de la Sainte-Chapelle. *Le travail au Moyen Âge : techniques, production, marchés, séminaire, Saint-Denis, France, Université Paris 8, 24 avril 2013.*

82. Leroux L. 2013. Identification de la provenance des albâtres gypseux utilisés en sculpture. *Séminaire de recherche sur les carrières et la construction*, *LAMOP-UMR 8589, Université Paris I, 8 décembre 2013*.

83. Leroux L. 2013. Présentation des bases de données Monumat et Pierresud. *Réunion des CRMH, Nantes, 12 juin 2013.*

84. Merckx B., Mertz J.D., Dudoignon P., Giovannacci D., Garnier J.P. 2013. Relationship of roughness of building stones on the effective thermal conductivity determined by transient hot-wire method. *European geosciences union general assembly 2013*, *Vienna, Austria, 7-12 April 2013*.

85. Moularat S., Draghi M. (…) Bousta F., Orial G. 2013. Étude et compréhension de la dynamique de colonisation microbienne des supports : vers l'élaboration de nouveaux traitements préventifs adaptés aux environnements intérieurs. *La qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments : causes, effets, prévention et gestion des pollutions, La Rochelle, 19-20 novembre 2013.*

86. Panel L.N., Philippon J., De Reyer D., Nowik W., Richardin P., Gandolfo S. 2013. La chasuble dite de Sainte Aldegonde. *Colloque du CIETA, Histoire des collections et de la recherche dans le domaine des textiles*, *Lyon, 30 septembre-4 octobre 2013*.

87. Saheb M., Chabas A., Michelin A., Mertz J.D., Colas E. *[et al.].* 2013. Isotopic labeling for the understanding of the alteration of limestone used in built cultural heritage. *2013 MRS Fall meeting & exhibit, Boston, USA,1-6 December 2013.*

88. Saheb M. [...] Mertz J.D., Colas E. *[et al.].* 2013. Utilisation d'outils isotopiques pour l'étude de l'altération de calcaire. *14e congrès français de sédimentologie, Paris, 5-7 novembre 2013.*

89. Texier A. 2013. Peinture industrielle et patrimoine, du XIXe au XXe siècle. *Journées scientifiques et techniques du CEFRACOR*, *Paris, École nationale supérieure de chimie , 4-5 juin 2013*.

90. Touron S. 2013. Investigación arqueométrica y conservación del arte rupestre en Francia : ejemplos, soluciones e investigaciones asociadas. *Mexico, Université nationale autonome du Mexique (UNAM), 28 juin 2013.*

91. Touron S. 2013. La gruta de Lascaux : el principio de la historia de la conservación de las grutas ornadas en Francia. *Mexico, Coordinación nacional de conservación del patrimonio cultural, Instituto nacional de antropologia e historia (CNCPC-INAH), 28 juin 2013.*

92. Vergès-Belmin V. 2013. Le nettoyage de la pierre par laser. *Séminaire de recherche, évolutions, enjeux et transformations du patrimoine, 1913-2013 : les progrès techniques, Paris, Institut national du patrimoine, 18 février 2013.*

93. Vergès-Belmin V. 2013. Développements récents de la recherche en matière de consolidation par les nanochaux. *Journée du groupe de travail Pierre-Plâtre-Terre, SFIIC, l'utilisation des nanoparticules dans le domaine de la conservation restauration, Paris, 12 avril 2013.*

94. Bourguignon E. 2014. Laboratory tests for the assessment of the efficacy, compatibility and durability of alkoxides consolidants. *Nanomatch final conference, Museo Correr, Venice, Italy, October 17th, 2014.*

95. Celle S. 2014. Research laboratory for historical monuments in France: outstanding scientific contributions in the field of heritage conservation. *Outstanding scientific contributions in the field of heritage conservation in France, San Francisco, 4th November 2014.* San Francisco, Historic resources committee of the AIA.

96. Chabas A., De Reyer D., Leroux L. 2014. L'encrassement en intérieur : mesures réalisées au Musée de Cluny et au Musée des monuments français. *Journée du groupe de travail Pierre-Plâtre-Terre, SFIIC, point sur les techniques de nettoyage et de conservation des œuvres en pierre et en plâtre conservées en intérieur*, *Paris, 16 mai 2014*.

97. CROLLER L., TEXIER A., PALLOT-FROSSARD I. 2014. L'utilisation de la fonte de fer dans les décors extérieurs de l'Opéra Garnier. *Colloque international La fonte d'art française en France et dans le monde... les chemins de la diffusion*, *Saint-Dizier, 25-26 septembre 2014.*

98. DE LERA A., BOUSTA F., VERGÈS-BELMIN V. 2014. Hydrocolloids to clean porous inorganic materials. *International conference on fortified heritage: management and sustainable development, Pamplona, 15-17 October 2014.*

99. DE LERA A., VERGÈS-BELMIN V., BOUSTA F. 2014. Possibilités et limites des nettoyages de matériaux poreux par gels polysaccharides. *Journée du groupe de travail Pierre-Plâtre-Terre, SFIIC, point sur les techniques de nettoyage et de conservation des œuvres en pierre et en plâtre conservées en intérieur*, *Paris, 16 mai 2014*.

100. DE REYER D. 2014. La vitrine du reliquaire de saint Caprais. *Journées d'études de l'Association des conservateurs des antiquités et objets d'art de France, La présentation des objets mobiliers classés ou inscrits : sécurisation et conservation préventive*, *Paris, INP, 7 avril 2014*.

101. DETALLE V. 2014. *In situ* study of mural painting: the place of LIBS in the general analytical strategy. *8th International conference on laser induced breakdown spectroscopy (LIBS 2014), Beijing, China, 8-12 September 2014*.

102. HUNAULT M., CALLAS G., GALOISY L., LOISEL C., BAUCHAU F., HÉROLD M. 2014. Mediaeval blue stained glasses: from spectroscopy to history. *Glassac14, Glass science in art and conservation*, *Durham, 10-12 septembre 2014*.

103. JOURD'HEUIL I., DETALLE V. 2014. Les roses peintes des travées occidentales. *La cathédrale Notre-Dame de Chartres, Chartres, 7 novembre 2014*

104. LAUTIER C., LOISEL C. 2014. Étude des vitraux de la façade occidentale récemment restaurés : les fenêtres romanes et la rose gothique. *La cathédrale Notre-Dame de Chartres, Chartres, 7 novembre 2014.*

105. LE POGAM P.Y., LEROUX L. 2014. Alabaster mourners of the Tomb of Jean de France, duke de Berry (Étienne Bobillet, Paul Mosselmann, middle of the 15th century). Study: dialogue between a curator and a physicist in front of an artefact. *Synchrotron radiation and neutrons in art and archaeology conference (SR2A-2014)*, *Paris , Musée du Louvre, 9-12 septembre 2014.*

106. LEROUX L., LOISEL C. 2014. Les apports des études scientifiques pour la conservation-restauration des vitraux de la Sainte-Chapelle de Paris. *Le travail au Moyen Âge : techniques, production, marchés*, *séminaire, Saint-Denis, France, Université Paris 8, 24 avril 2013.*

107. MALAVERGNE O., LEBOUCHER É. 2014. PARCOURS : PAtrimoine culturel et Restauration-Conservation : Ontologie pour l'Usage d'un Référentiel commun aux différentes Sources de données : présentation du projet. *Journée Patrima : SHS et sciences de l'information*, *Versailles, 31 janvier 2014.*

108. TIENNOT M., BOURGÈS A., MERTZ J.D. 2014. Clays, archeological tablets and ethyl silicate: evaluation of the consolidation mechanisms. *16th international conference on experimental mechanics, ICEM 16*, *Cambridge, 7-11 July 2014.*

109. VERGÈS-BELMIN V., TRICHEREAU B., BOUSTA F., TOURON S. 2014. Analyses des altérations et des colorants sur les supports du cairn de Gavrinis. *Séminaire Méthodes et approches nouvelles : de l'acquisition des données à l'expérimentation archéologique dans l'analyse des représentations gravées, Université de Nantes, 5 novembre 2014.*

110. VERGÈS-BELMIN V. 2014. Les interventions du LRMH sur la pierre à la cathédrale de Chartres. *La cathédrale Notre-Dame de Chartres, Chartres, 7 novembre 2014.*

111. WALBERT C., ESLAMI J., BEAUCOUR A.L., BOURGÈS A., NOUMOWE A. 2014. Dégradation des propriétés mécaniques de différentes pierres de construction soumises à des cycles de gel-dégel. *32e rencontres universitaires de Génie civil, de la préservation à l'innovation*, *Orléans, 4-6 juin 2014*.

3.3.8 C-AFF : Communications par affiche dans un congrès international ou national

112. De Lera A., Vergès-Belmin V., Bousta F. 2013. Nettoyage de matériaux poreux inorganiques par gels polysaccharides : possibilités et limites. *In* : *Les sciences de la conservation du patrimoine et le développement durable : acquis, recherche, innovation = Cultural heritage conservation science & sustainable development: experience, research and innovation*, *Paris, 23-25 octobre 2013*.

113. Ferrand J., Rossano S., Loisel C., Trcera N., Farges F., Van Hullebusch E., Bousta F., Pallot-Frossard I. 2013. The browning phenomenon of medieval stained glass windows. *Conférence Goldschmidt 2013, Florence, Italy, 25-30 August 2013.*

114. Gibeaux S., Touron S. La caverne du Dragon. 2013. *Journées européennes du patrimoine, Oulches-la-Vallée-Foulon, 14-15 septembre 2013*, 6 posters.

115. Giovannacci D., Martos-Levif D., Detalle V. *[et al.]*. 2013. Terahertz time-domain reflectometrometry system. *In* : *Réunion finale de Charisma*, *Florence, Italie, 6-7 mars 2013*.

116. Guiavarc'h M., Querré G. 2013. Le gisement de fibrolite de Plouguin (Finistère, France) : étude pétrographique et minéralogique de la matière première de haches polies néolithiques. *In* : *XIXe colloque du GMPCA : Archéométrie*, *Caen, 22-26 avril 2013.*

117. Syvilay D., Texier A., Arles A., Gratuze B., Duchêne S., Detalle V. 2013. Détection et quantification d'éléments traces dans des matériaux du patrimoine à base de plomb. *In* : *Journées LIBS*, *Lyon, 5 et 6 juin 2013.*

118. Syvilay D., Texier A., Arles A., Gratuze B., Duchêne S., Detalle V. 2013. Detection of trace elements in leads-based historical materials by LIBS. *In* : *International symposium Fundamentals of laser-assisted micro- and nanotechnologies, FLAMN-13*, *Saint-Pétersbourg, Russia, June 24-28 2013*.

119. Vallet J.M., Detalle V., Guillon O., Trichereau B., Mouhoubi K., Sivilay D., Bodnar J.L. 2013. Analyses non destructives et *in situ* des dorures des fresques de Giovannetti à Villeneuve-lez-Avignon (France). *In* : *5e Rencontres internationales du patrimoine architectural méditerranéen*, *Marseille, 16-18 octobre 2013*.

120. Fraysse A., Wojcieszak M., Percot A., Noinville S, Marcellan A., De Reyer D., Colomban P. 2014. Consolidation of silk fabric by fibroin spraying and sericin dipping. *In* : *Gordon research conference: Scientific methods in cultural heritage research: challenges and complexity in characterization and conservation*, *Newry, Maine (USA), 27th July-1st August 2014.*

121. Surma F., Checroun E., Rosenbaum L., Detalle V. *[et al.]*. 2014. On site and laboratory pigment identification by LIBS on a mural painting, church of St. Melaine at Rennes, France. *In* : *8th International conference on laser induced breakdown spectroscopy (LIBS 2014): résumés, Beijing, China, 8-12 September 2014.*

122. Syvilay D. 2014. Standard normal variate transformation on LIBS spectra. *In* : *8th International conference on laser induced breakdown spectroscopy (LIBS 2014): résumés, Beijing, China, 8-12 September 2014.*

123. Syvilay D., Parisse S., Trichereau B., Detalle V. 2014. Separation of lead pigments with different painting techniques: a spectroscopic study. *In : 8th International conference on laser induced breakdown spectroscopy (LIBS 2014): résumés, Beijing, China*, *8-12 September 2014*.

3.3.9 Ouvrages scientifiques

Chapitres d'ouvrages

124. Bourgès A., Vergès-Belmin V. 2013. Desalination of low porosity limestone masonry. *In* : Heritage A., ed. *Desalination of historic buildings, stone and wall paintings.* London, Archetype publ., p. 113-121.

125. Bourgès A., Vergès-Belmin V. 2013. Practical advice regarding consistency and working properties of poultices. *In* : Heritage A., ed. *Desalination of historic buildings, stone and wall paintings.* London, Archetype publ., p. 49-53.

126. HERITAGE A., HERITAGE A., FUNKE F., VERGÈS-BELMIN V., BOURGÈS A. 2013. Current use of poultices in the conservation of monuments. *In* : HERITAGE A., ed. *Desalination of historic buildings, stone and wall paintings.* London, Archetype publ., p. 8-13.

127. MARIE-VICTOIRE É. 2013. Évolution et durabilité. *In* : BARBOU C., coord. *Peaux de béton : 65 architectures contemporaines*. Paris, Dunod, p. 161-162.

128. VERGÈS-BELMIN V., HERITAGE A., BOURGÈS A. 2013. Powdered cellulose poultices in stone and wall painting conservation : myths and realities. *In :* HERITAGE A., ed. *Desalination of historic buildings, stone and wall paintings.* London, Archetype publ., p. 62-73.

129. LEROUX L. 2014. L'identification des pierres en œuvre dans le patrimoine bâti. *In* : DILLMANN P., BELLOT-GURLET L., dir. *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes.* Paris, éditions des archives contemporaines, p. 35-55.

130. LEROUX L., Blanc A. 2014. Marbres blancs et pierres marbrières colorées : de la carrière au décor. *In* : DILLMANN P., BELLOT-GURLET L., dir. *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes.* Paris, éditions des archives contemporaines, p. 57-71.

131. PALLOT-FROSSARD I. 2014. Patrimoine et création, la matière dans tous ses états. *In* : Hérold M., David V., dir. *Vitrail : Ve-XXIe siècle*. Paris, éditions du Patrimoine, Centre des monuments nationaux, p. 539-563.

3.3.10 PV : Publications de vulgarisation

132. CELLE S. 2013. Pratique et recherche sur le bois dans le patrimoine culturel. *In* : PALLOT-FROSSARD I., dir. *La lettre du LRMH*, 2 : 1-4.

133. CELLE S. 2013. Nouvelles technologies analytiques appliquées à la problématique des peintures murales. *In* : PALLOT-FROSSARD I., dir. *La lettre du LRMH*, 3 : 1-4.

134. PALLOT-FROSSARD I., CELLE S. 2013. LRMH : mode d'emploi. *In* : PALLOT-FROSSARD I., dir. *La lettre du LRMH*, 1 : 1-4.

135. CELLE S. 2014. Conservation et restauration des pierres des monuments : approfondissement des connaissances et exploration de nouveaux champs. *In* : PALLOT-FROSSARD I., dir. *La lettre du LRMH*, 4 : 1-4.

3.3.11 PAT : Productions artistiques théorisées (expositions, ...)

136. *L'art du vitrail : l'Aube remarquable : exposition de préfiguration de la Cité du vitrail* (Exposition. Troyes, Cité du vitrail. 2013). Troyes, Conseil général de l'Aube, 2013. 67 p.

3.3.12 PT : Publications de transfert

137. LERA SANTIN A. 2012. *Nettoyage de matériaux poreux inorganiques (brique, pierre, marbre, plâtre et fresque) par gel d'agar : possibilités et limites*. Mémoire post-doctoral., 128 p.

138. MOULARAT S. [...] BOUSTA F., ORIAL G. *[et al.]*. 2013. *Étude et compréhension de la dynamique de colonisation microbienne des supports : vers l'élaboration de nouveaux traitements préventifs adaptés aux environnements intérieurs = Study and comprehension of dynamics of surfaces microbial colonization to develop new preventive treatments suited to indoor environments: programme Primequal : rapport final*. Champs-sur-Marne, LRMH ; CSTB, 2013. 112 p.

139. VENAULT DE BOURLEUF É. 2013. *Caractérisation du phénomène de brunissement du vitrail et évaluation de traitements de réduction*. CeROArt [en ligne], mis en ligne le 11 mai 2013, http://ceroart.revues.org/3237.

3.3.13 Autres productions (bases de données, logiciels enregistrés, rapports de fouilles, rapports d'étude, guides techniques, catalogue d'exposition, rapports intermédiaires et finaux de grands projets internationaux, etc.)

Rapport de recherche

140. ANGER R., FONTAINE L., coord. 2013. *Projet Paterre+. Interactions argiles/biopolymères : patrimoine architectural en terre et stabilisants naturels d'origine animale et végétale : rapport final* [2011-2013] du projet de recherche Paterre+ financé par le ministère de la Culture et de la Communication dans le cadre du programme national de recherche sur la connaissance et la conservation des matériaux du patrimoine culturel. Paris : ministère de la Culture et de la Communication, 585 p.

Rapports d'étude

2012

141. **Effet de la congélation sur des mastics de comblement utilisés en mobilier : étude expérimentale** / DE REYER D., MAURIN E. *(Rapport LRMH n° 1306A, juin 2012)*. 7 f. *Nota* : confidentiel.

142. **ROCHEFORT (Charente-Maritime, 17)**. Musée national de la marine. Collection d'étoffes ethnographiques provenant de l'ancienne école de médecine navale. Tapas : identification des fibres végétales / DE REYER D., NOWIK W., MIRAMBET F. *(Rapport LRMH n° 1311A, mai 2012)*. 62 p.

2013

143. **AGDE (Hérault, 34)**. Villa dite château Laurens. Salon des musiques : vitraux Art nouveau (XIXe siècle) : restauration intérieure / LOISEL C., GROULT E., BAUCHAU F., TEXIER A. *(Rapport LRMH n° 1345A, août 2013)*. 26 f.

144. **AMÉRIQUE CENTRALE** (Mexique, Guatemala, Nicaragua et Salvador). Rapport de mission : ateliers de conservation en art rupestre, 26 juin 2013 au 22 juillet 2013/ TOURON S. *(Rapport LRMH n° 1356A, septembre 2013)*. 9 f.

145. **ARABIE SAOUDITE**. Al Ulâ. Site de Madâ'in Sâlih [Cité antique de Hégra]. Fragments de textiles archéologiques du Ier-IIe siècle avant J.C. découverts dans le tombeau IGN 117 : identification des fibres textiles / DE REYER D. *(Rapport LRMH n° 1189B, janvier 2013)*. 14 f.

146. **ARLES (Bouches-du-Rhône, 13)**. Église Saint-Trophime. Galerie sud : voûte et arcature. Caractérisation de dépôts superficiels / VERGÈS-BELMIN V., GUIAVARC'H M. *(Rapport LRMH n° 510J, janvier 2013)*. 50 f.

147. **BELFORT (Territoire de Belfort, 90)**. Gare de Belfort. Halle des messageries : état sanitaire général [texte imprimé et ressource électronique] / MARIE-VICTOIRE É. *(Rapport LRMH n° 1357A, septembre 2013)*. 16 f.

148. **CHARTRES (Eure-et-Loir, 28)**. Cathédrale Notre-Dame. Tour sud. L'Espérance et La Charité, statues en pierre calcaire provenant de l'ancien jubé (XVIIIe siècle) : caractérisation des pierres, analyse de sels, conseils de conservation / VERGÈS-BELMIN V., LEROUX L., BRISSAUD D., GUIAVARC'H M. *(Rapport LRMH n° 236H, août 2013)*. 39 f.

149. **CHARTRES (Eure-et-Loir, 28)**. Cathédrale Notre-Dame. Transept, bras sud, portail central, ébrasement droit : essais de nettoyage par laser Nd:YAG selon deux modes : short-free running (SFR) et Long Q-Switched (LQS) / VERGÈS-BELMIN V., GUIAVARC'H M. *(Rapport LRMH n° 236G, septembre 2013)*. 93 f.

150. **CORBEIL-ESSONNES (Essonne, 91)**. Église Saint-Étienne, voûte. Polychromie (XVe siècle) : étude stratigraphique et analyses physico-chimiques / TRICHEREAU B., MARTOS-LEVIF D., DUCHÊNE S., DETALLE V., DE REYER D. *(Rapport LRMH n° 1321A, mars 2013)*. 44 f.

151. **CÉRILLY (YONNE, 89)**. Église Saint-Laurent. Le Cardinal de Bérulle faisant hommage à la Vierge [...] (1788), peinture à l'huile sur toile de Jean-Bernard Restout : contamination fongique et suivi climatique / BOUSTA F. *(Rapport LRMH n° 1358A, octobre 2013)*. 75 f.

152. **DONZENAC (Corrèze, 19)**. Église Saint-Martin. Trésor. Objets d'orfèvrerie : identification de la contamination fongique et mesures de conservation / BOUSTA F. *(Rapport LRMH n° 1341A, mars 2013)*. 7 f.

153. **ÉPINAL (Vosges, 88)**. Musée départemental d'art ancien et contemporain. Fragment de vitrail (XVI[e] siècle) : caractérisation de l'altération du verre / Bauchau F., Loisel C. *(Rapport LRMH n° 1362A, novembre 2013)*. 15 f.

154. **ÉTATS-UNIS. NEW YORK**. Metropolitan Museum of art - Cloisters Museum. Saint-Paterne-Racan (Indre-et-Loire, 37). Abbaye de la Clarté Dieu. Gisant de Jean d'Alluyes (4[e] quart du XIII[e] siècle) : identification de la nature et de la provenance de la pierre / Leroux L. *(Rapport LRMH n° 1315C, juillet 2013)*. 4 f.

155. **ÉTATS-UNIS. NEW YORK**. Metropolitan Museum of art - Cloisters Museum. Sculptures provenant des Vosges : Croix de chemin représentant la Crucifixion et sainte Anne, la Vierge et l'Enfant (fin XV[e] siècle). Reliefs représentant les scènes de la Passion du Christ (fin XV[e]-début XVI[e] siècle) : identification de la nature et de la provenance de la pierre / Leroux L. *(Rapport LRMH n° 1315B, juillet 2013)*. 5 f.

156. **GRANDE-BRETAGNE**. **LINCOLN**. The Cathedral church of the Blessed Virgin Mary, Nave, window SG44 [s. XXXIV, CVMA numbering system], panel 23 and unknown panel. Stained glass window by J.P. Hedgeland (1861) : analyses and characterization of the purple glass pathology / Venault de Bourleuf É., Bauchau F., Loisel C. *(Rapport LRMH n° 1340C, June 2013)*. 11 f.

157. **GRANDE-BRETAGNE. LINCOLN**. The Cathedral church of the Blessed Virgin Mary, Saint Hugh Choir Clerestory, window SC22 [s. VIII, CVMA numbering system]. Acts of the Apostles, St. Jude, stained glass window by Sutton Brothers and Clayton & Bell (19[th] century) : analyses and characterization of the green glass pathology / Venault de Bourleuf É., Bauchau F., Loisel C. *(Rapport LRMH n° 1340B, June 2013)*. 10 f.

158. **GRANDE-BRETAGNE. LINCOLN**. The Cathedral church of the Blessed Virgin Mary, South West transept, window SG32 [s. XXVIII, CVMA numbering system], panel 6 : Medieval stained glass window (13[th] century) : assessment and characterization of the pathologies treatment tests on black accretions and manganese browning / Venault de Bourleuf É., Loisel C. Bauchau F. *(Rapport LRMH n° 1340A, avril 2013)*. 39 f.

159. **GUATEMALA**. **Région de Guatemala**. Guatemala (ville), Université San Carlos : roche gravée de la Rectoria. Amatitlan : roche de l'Homme de Monte Sion. Nettoyage mécanique des microorganismes de deux roches gravées / Touron S. *(Rapport LRMH n° 1355A, novembre 2013)*. 13 f.

160. **HONDURAS. Département de Lempirasite** : abris de Cueva Pintada et Cueva del Duende. SALVADOR (départements de Morazanet et de La Union) : abris de Coroban et Sirica. GUATEMALA (département de Suchitepéquez) : roche peinte de Xuk-Muk : identification de pigments Lencas et de leur support rocheux / Touron S. *(Rapport LRMH n° 1360A, octobre 2013)*. 41 f.

161. **LABOSSE (Oise, 60)**. Église paroissiale Saint-Barthélemy. Retable en bois sculpté (XVI[e] siècle) : étude statigraphique et analyses physico-chimiques / Trichereau B., Martos-Levif D., Detalle V., Duchêne S., Brissaud D. *(Rapport LRMH n° 1351A, novembre 2013)*. 39 f.

162. **LARMOR-BADEN (Morbihan, 56)**. Île de Gavr'inis, cairn : étude stratigraphique, analyses physico-chimiques et microbiologiques / Trichereau B., Duchêne S., Detalle V., Martos-Levif D., Brissaud D., François A. *(Rapport LRMH n° 682C, novembre 2013)*. 26 f.

163. **LOIGNÉ-SUR-MAYENNE (Mayenne, 53).** Logis seigneurial de Viaulnay, chapelle : évaluation de la restauration des lambris / Maurin E. ; d'après un rapport d'étude de Maujean J., Pouchet M., Tortillon T. ; sous la dir. de Galimard P. *(Rapport LRMH n° 1343A, juin 2013)*. 25 f.

164. **LYON (Rhône, 69)**. Cathédrale Saint-Jean. Choeur. Fenêtres hautes : baies 100, 107 et 108, vitraux (XIII[e] siècle) : état sanitaire et analyses scientifiques / Loisel C., Bauchau F. *(Rapport LRMH n° 148D, mai 2013)*. 28 f.

165. **LYON (Rhône, 69)**. Musée des tissus et des arts décoratifs. Identification de cinq tissus coptes provenant des fouilles d'Antinoë / De Reyer D., Nowik W., Brissaud D. *(Rapport LRMH n° 1144E, septembre 2013)*. 16 f.

166. **LYON (Rhône, 69)**. Musée des tissus et des arts décoratifs. Identification de neuf tissus coptes provenant des fouilles d'Antinoë / De Reyer D. *(Rapport LRMH n° 1144F, octobre 2013)*. 27 f.

167. **MAUBEUGE (Nord, 59)**. Église Saint-Pierre-et-Saint-Paul. Chasuble dite de sainte Aldegonde : analyse des fibres, lamelle métallique et colorants / De Reyer D., Nowik W. *(Rapport LRMH n° 875C, mai 2013)*. 24 f. *En annexe* : compte-rendu d'étude C2RMF n° 25202 : Datation par le carbone-14 / Gandolfo N., Richardin P., 9 f.

168. **NANCY (Meurthe-et-Moselle, 54)**. Muséum-Aquarium, réserves : identification de la contamination biologique et préconisations de mesures de conservation / BOUSTA F., FRANÇOIS A. *(Rapport LRMH n° 1361A, octobre 2013)*. 10 f.

169. **NANTES (Loire-Atlantique, 44)**. Cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul. Tombeau de François II et Marguerite de Foix (début XVIe siècle) : identification des matériaux en œuvre / LEROUX L. *(Rapport LRMH n° 1363A, novembre 2013)*. 10 f.

170. **NEUFCHÂTEAU (Vosges, 88)**. Église paroissiale Saint-Nicolas. Onction du corps du Christ, groupe sculpté en pierre polychrome (XVe siècle) : étude stratigraphique et analyses physico-chimiques / TRICHEREAU B. *(Rapport LRMH n° 1339A, mars 2013)*. 21 p.

171. **NICARAGUA. Villa Sandino** (département de Chontales). Piedra pintada : nettoyage mécanique de microorganismes sur roches gravées / TOURON S. *(Rapport LRMH n° 1290B, décembre 2013)*. 9 f.

172. **OLMETA DI CAPOCORSO (Haute-Corse, 2B)**. Grotta Scritta : étude sanitaire et identification de pigments / TOURON S., VERGÈS-BELMIN V., BOUSTA F. *(Rapport LRMH n° 1354A, octobre 2013)*. 20 f.

173. **OULCHE-LA-VALLÉE-FOULON (Aisne, 02)**. Carrière dite Caverne du Dragon : synthèse des enregistrements climatiques / TOURON S. *(Rapport LRMH n° 1318B, avril 2013)*. 22 f.

PARIS (1er) :

174. Musée des Arts décoratifs. Sainte Catherine d'Alexandrie et sainte Catherine de Sienne, reliefs en terre cuite (XVe siècle) attribués à Giovanni Fonduli : microstructure, distribution porale et isotherme de sorption des efflorescences / VERGÈS-BELMIN V., GUIAVARC'H M., CAMBON DE LAVALETTE A. *(Rapport LRMH n° R1359A, octobre 2013)*. 10 f.

175. Musée du Louvre. Département des antiquités égyptiennes. Chien d'Assiout, sculpture en pierre calcaire : caractérisation d'une saumure de dessalement en bain / VERGÈS-BELMIN V. *(Rapport LRMH n° 1352A, juillet 2013)*. 7 f.

176. Musée du Louvre. Département des objets d'art. Salle de l'ordre du Saint-Esprit : Manteau de chevalier de l'ordre du Saint-Esprit (fin XVIIe siècle) : étude de fils métalliques / DE REYER D. *(Rapport LRMH n° 1167C, décembre 2013)*. 53 f.

177. Palais de justice, bâtiment quai des Orfèvres construit par Albert Tournaire (1911) : façades : identification des pierres en œuvre et couleur du cadran solaire / LEROUX L. *(Rapport LRMH n° 1350A, juillet 2013)*. 17 f.

178. Sainte-Chapelle. Façade occidentale : rose, balustrade des terrasses hautes, pignon. Identification des pierres en œuvre / LEROUX L. *(Rapport LRMH n° 1338A, janvier 2013)*. 10 f.

179. Sainte-Chapelle. Façade occidentale : rose. Recherche des anciens traitements de surface de la pierre / LEROUX L., VERGÈS-BELMIN V. *(Rapport LRMH n° 1338B, août 2013)*. 31 f.

180. Sainte-Chapelle. Nef, travées L et M : baies 107 et 109. Vitraux (XIIIe siècle) : analyse des verres et des grisailles / BAUCHAU F., LOISEL C. *(Rapport LRMH n° 53F, août 2013)*. 25 f. *Nota* : confidentiel.

181. Sainte-Chapelle. Nef, travées L et M : baies 107 et 109. Vitraux (XIIIe siècle) : état sanitaire et analyses scientifiques / BAUCHAU F., LOISEL C. ; avec la coll. de LATTUATI-DURIEUX A. *(Rapport LRMH n° 53E, juillet 2013)*. 34 f.

182. **PARIS (15e)**. Hôpital Necker, tour Keith Haring : fresque (1987) de Keith Haring. Étude statigraphique et analyses physico-chimiques / MARTOS-LEVIF D., DETALLE V., DUCHÊNE S., TRICHEREAU B., BALCAR N. *(Rapport LRMH n° 1324B ; Rapport C2RMF n° 26794, août 2013)*. 16 f.

183. **PARIS (16e)**. Musée national de la Marine. Barque latine : maquette dite *"l'hirondelle"*, demi-coque en bois polychrome. Identification des altérations / VERGÈS-BELMIN V., MARTOS-LEVIF D., NAVARRO-POTEL N. *(Rapport LRMH n° 1349A, juin 2013)*. 22 f.

184. **PATRIMONIO (Haute-Corse, 2B)**. U Nativu, statue-menhir provenant de Barbaghju : évaluation de l'état / VERGÈS-BELMIN V., TOURON S. *(Rapport LRMH n° 508E, août 2013)*. 8 f.

185. **PIÈVE (Haute-Corse, 2B)**. Statues-menhirs de Murtola, Murello et Buccentone : évaluation de l'état et conseils de conservation / Vergès-Belmin V., Touron S. *(Rapport LRMH n° 508G, août 2013).* 14 f.

186. **SAINT-DENIS (Seine-Saint-Denis, 93)**. Basilique Saint-Denis (nouvelle cathédrale). Deuxième travée sud, clefs de voûte. Analyses physico-chimiques, études stratigraphiques et techniques / Trichereau B., Martos-Levif D., Duchêne S., Detalle V. *(Rapport LRMH n° 107G, juin 2013).* 11 f.

187. **SAINT-DENIS (Seine-Saint-Denis, 93)**. Cathédrale Saint-Denis (ancienne basilique). Façade occidentale, travée nord : état d'altération des rois en haut-relief / Mertz J.D. *(Rapport LRMH n° 107H, février 2013).* 14 f.

188. **SAINTE-LUCIE-DE-TALLANO (Corse-du-Sud, 2A)**. Chapelle Saint-Jean-Baptiste, mur sud : caractérisation de graffitis et conseils d'élimination / Vergès-Belmin V., Touron S. *(Rapport LRMH n° 1353A, août 2013).* 7 f.

189. **SARTÈNE (Corse-du-Sud, 2A)**. Cauria, site archéologique, dolmen de Fontanaccia : analyse d'efflorescences salines / Vergès-Belmin V., Touron S. *(Rapport LRMH n° 508F, août 2013).* 8 f.

190. **SCEAUX (Hauts-de-Seine, 92)**. Musée de l'Île-de-France. Le Bouquet bleu (1929), peinture à l'huile sur toile de Jean Fautrier : identification de la contamination biologique et préconisation de mesures de conservation / François A., Bousta F. ; photogr. Bouchardon D. *(Rapport LRMH n° 1347A, juin 2013).* 11 f.

191. **SEMUR-EN-AUXOIS (Côte-d'Or, 21)**. Collégiale Notre-Dame, façade occidentale : expérimentation de mortiers biologiques / Orial G., François A., Bousta F., Guiavarc'h M. *(Rapport LRMH n° 1342A, juin 2013).* 14 f.

192. **TAVERA (Corse-du-Sud, 2A)**. Statue-menhir : évaluation de l'état et conseils de conservation [texte imprimé et ressource électronique] / Vergès-Belmin V., Touron S. *(Rapport LRMH n° 508D, septembre 2013).* 13 f.

193. **VAISON-LA-ROMAINE (Vaucluse, 84)**. Ensemble archéologique. Identification de marbres blancs et colorés mis en œuvre sur le site antique. Villa du Paon : fouilles anciennes et récentes et Maison à la tonnelle / Blanc A., Blanc P., Bromblet P., Leroux L. *(Rapport LRMH n° 1090B, avril 2013).* 22 f.

194. **VIGNEUX-HOCQUET (Aisne, 02)**. Église Saint-Martin. Poutre de Gloire : diagnostic établi par inspection visuelle et résistographie / Maurin E., Dumail J.F. *(Rapport LRMH n° 1344A, avril 2013).* 5 f.

2014

195. **AUCH (Gers, 32).** Cathédrale Sainte-Marie. Façade occidentale : évaluation de la faisabilité d'un traitement préalable à la consolidation des sculptures en calcaire gréseux / Mertz J.D., Guiavarc'h M. *(Rapport LRMH n° 1365A, juillet 2014).* 11 f.

196. **BAYEUX (Calvados, 14)**. Centre culturel Guillaume le Conquérant. Broderie de la Reine Mathilde (XIe siècle) ; contrôle de l'état de conservation / De Reyer D., Bouchardon D. *(Rapport LRMH n° 323D, juillet 2014).* 72 f.

197. **BAYONNE (Pyrénées-Atlantiques , 64)**. Cathédrale Notre-Dame. Nef, fenêtres hautes : baies 214, 216, 218, 220, 222, 224. Vitraux (XVe siècle) : état sanitaire et analyses scientifiques / Bauchau F., Loisel C., Texier A. *(Rapport LRMH n° 527D, juin 2014)*. 38 f.

198. **BESANÇON (Doubs, 25)**. Théâtre municipal. État d'altération des socles et des colonnes par contrôle non destructif ultrasonique / Mertz J.D. *(Rapport LRMH n° 1370A, février 2014)*. 13 f.

199. **CHAMBÉRY (Savoie, 73)**. Église Saint-Pierre-de-Lémenc. Crypte. *Mise au tombeau* (XVe siècle) : identification de la pierre en œuvre et de la polychromie / Leroux L., Detalle V., Trichereau B., Lemasson Q. *(Rapport LRMH n° 1303A, février 2014)*. 43 p.

200. **CHARTRES (Eure-et-Loir, 28)**. Cathédrale Notre-Dame. Nef, premières travées, baies hautes peintes en trompe-l'œil : caractérisation de la polychromie (XIIIe siècle) par LIBS / Trichereau B., Detalle V., Lemasson Q. *(Rapport LRMH ; C2RMF n° 1261B, juin 2014)*. 117 p.

201. **GLUX-EN-GLENNE (Nièvre, 58). SAINT-LÉGER-SOUS-BEUVRAY (Saône-et-Loire, 71)**. Oppidum de Bibracte, site archéologique : évaluation de traitements de consolidation de coupes stratigraphiques archéologiques en terre crue / Bourgès A. *(Rapport LRMH n° 1372A, mai 2014)*. 5 f.

202. **MARQUION (Pas-de-Calais, 62).** Coffret de toilette ou d'oculiste en bronze datant de la période gallo-romaine : étude des produits de corrosion / Texier A., Azéma A. *(Rapport LRMH n° 1373A, mai 2014).* 16 f.

203. **MILLY-LA-FORÊT (Essonne, 91).** *Le Cyclop*, sculpture monumentale (XXe siècle) de Jean Tinguely, face aux miroirs de Niki de Saint-Phalle : état sanitaire et recherche de matériaux pour la restauration / TEXIER A., BAUCHAU F., LOISEL C., AZÉMA A., VENAULT DE BOURLEUF É. *(Rapport LRMH ; Cercle des partenaires du patrimoine n° 1276B, mai 2014)*. 157 f.

204. **PARIS (1er)**. Sainte-Chapelle. Rose occidentale : vitraux (XVe siècle). Face interne : caractérisation d'une couche grise / BAUCHAU F., LOISEL C. *(Rapport LRMH n° 53G, juillet 2014).* 11 f.

205. **PARIS (3e)**. Hôtel de Rohan. Quadrilatère Rohan Soubise. Façade sur cour : inspection à la nacelle et analyse de prélèvements dans le cadre de l'étude de programmation / VERGÈS-BELMIN V., LEROUX L. *(Rapport LRMH n° 429B, avril 2014).* 18 f.

206. **PARIS (4e)**. Hôtel Lambert. Cabinet des Bains : plafond. Étude stratigraphique et analyses physico-chimiques / RIVRY R., MARTOS-LEVIF D., DETALLE V., TRICHEREAU B., BRISSAUD D. *(Rapport LRMH ; Cercle des partenaires du patrimoine n° 1376A, juin 2014).* 93 p. *Nota* : confidentiel.

207. **PARIS (7e)**. Musée Rodin. Identification des marbres blancs utilisés dans les sculptures d'Auguste Rodin / LEROUX L., BLANC A., BLANC P. *(Rapport LRMH n° 1369A, juin 2014).* 16 f.

208. **PARIS (16e)**. Villas Jeanneret-Raaf et La Roche, actuellement fondation Le Corbusier. Façades sur square et patio : analyse des revêtements / MARTOS-LEVIF D., TRICHEREAU B., DETALLE V., DUCHÊNE S. *(Rapport LRMH n° 1346B, janvier 2014).* 19 f.

209. **PONT-SAINTE-MAXENCE (Oise, 60)**. Le Champ Lahyre, fouilles archéologiques. Sanctuaire monumental antique (Ier siècle) : vestiges d'une façade monumentale à arcatures et frise sculptée : préconisatiions pour la conservation des blocs et de la polychromie / LEROUX L., MARTOS-LEVIF D., BOUSTA F., LEPLAT J. *(Rapport LRMH n° 1378A, septembre 2014)*. 14 f.

210. **ROMORANTIN LANTHENAY (Loir-et-Cher, 41)**. Musée de Sologne : étude de deux éléments d'un épi de faîtage en plomb / TEXIER A., AZÉMA A., BOUICHOU M. *(Rapport LRMH n° 1374A, juillet 2014).* 18 f.

211. **SARTÈNE (Corse-du-Sud, 2A)**. Analyses par spectrométrie de fluorescence X des traces de couleurs des alignements de I-Stantari (site archéologique de Cauria) et des menhirs du musée départemental de préhistoire corse et d'archéologie / TOURON S., VERGÈS-BELMIN V. *(Rapport LRMH n° 508H, mars 2014).* 13 f.

212. **VALLON-PONT-D'ARC (Ardèche, 07)**. Grotte Chauvet-Pont-d'Arc : identifications des dépôts marron sur les passerelles et des produits utilisés pour le moulage d'une empreinte de pied humain. Préconisations / TEXIER A., AZÉMA A., TOURON S. *(Rapport LRMH n° 1029D, janvier 2014).* 17 f.

3.4 Expertises

3.4.1 Organisation de colloques et séminaires

Journée thématique « Utilisation des nanoparticules dans le domaine de la conservation-restauration ». 12 avril 2013, Paris.
Organisation : Section française de l'Institut international de conservation, groupe Pierre-plâtre-terre.
Lise LEROUX, co-organisateur.

Journées d'étude « Le Patrimoine, ça déménage ». 14-15 mai 2013, Paris, Cité de l'architecture et du patrimoine.
Organisation : Direction générale des Patrimoines, groupe de travail transversal « conservation-restauration », coordination : département du pilotage de la recherche et de la politique scientifique.
Élise LEBOUCHER, membre du comité d'organisation.

Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN-13), 24-28 June 2013, St Petersburg, Russia
Organisation : SPIE
Vincent DETALLE, membre du comité d'organisation.

4e journée d'étude « Lorsque nos certitudes sont mises à l'épreuve : ces objets qui nous surprennent ». 4 octobre 2013, Paris, C2RMF.
Organisation : Section française de l'Institut international de conservation, groupe Bois.
Emmanuel MAURIN, co-organisateur.

14e congrès annuel de l'Association des sédimentologistes français. 5-7 novembre 2013, Paris, Cité des sciences et de l'industrie.
Organisation : Association des sédimentologistes français (ASF).
Lise LEROUX, membre du comité scientifique et présidente de la session « Patrimoine et pierres de construction ».

Les 40 ans de BETOCIB. 4 décembre 2013, Paris, Palais d'Iéna.
Organisation : BETOCIB
Élisabeth MARIE-VICTOIRE, membre de la table ronde et guide de l'exposition « Auguste Perret, Huit chefs-d'œuvre »

Journées d'étude « S'unir pour préserver les patrimoines ». 18-19 mars 2014, Paris, Cité de l'architecture et du patrimoine.
Organisation : Direction générale des Patrimoines, groupe de travail transversal « Conservation-restauration », coordination : département du pilotage de la recherche et de la politique scientifique
Élise LEBOUCHER, membre du Comité d'organisation

Journée thématique « Point sur les techniques de nettoyage et de conservation des œuvres en pierre, plâtre et terre conservées en intérieur ». 16 mai 2014, Paris.
Organisation : Section française de l'Institut international de conservation, groupe Pierre-plâtre-terre
Lise LEROUX, co-organisateur

Journées LIBS France. 2-3 juin 2014, Paris, École de chimie de Paris
Organisation : Société française d'optique et comité LIBS France
Vincent DETALLE, membre du comité d'organisation.

Lacona X : international conference on lasers in the conservation of artworks. 9-13 June 2014, Sharjah, United Arab Emirates.
Organisation : Faculty of Archaeology,, Fayoum universitu (Egypt), ICCROM-ATHAR, regional conservation center (Sharjah)
Véronique VERGÈS-BELMIN, membre du comité scientifique, présidente de la session « Laser induced breakdown spectroscopy and other techniques »
Vincent DETALLE, membre du comité scientifique, président de la session « Poster »

5e journée d'étude « Restauration, reconstitution, copie... les limites des interventions en conservation-restauration ». 3 octobre 2014, Paris, C2RMF.
Organisation : Section française de l'Institut international de conservation, groupe Bois
Emmanuel MAURIN, co-organisateur

Journée « Recherche et industrie sur le management des ressources microbiennes », JRI2014. 7-9 octobre 2014, Narbonne.
Faisl BOUSTA, membre du comité scientifique
Stéphanie TOURON, membre du comité scientifique

Conférence internationale « Salt Weathering of Buidings and Stone Structures (SWBSS 2014). 14-16 octobre 2014, Bruxelles, Belgique.
Organisation : The Royal institute for cultural heritage
Véronique VERGÈS-BELMIN, présidente de la session « Measurement techniques »

Colloque européen « Biodétérioration de la pierre ». 7 novembre 2014, Cergy-Pontoise, Université.
Organisation : Université de Cergy-Pontoise, Fondation des sciences du patrimoine
Faisl BOUSTA, Lise LEROUX, membres du comité d'organisation

Colloque « Géologie du Bassin parisien : le cinquantenaire de l'AGBP ». 12-14 novembre 2014, Paris.
Organisation : Association des géologues du bassin parisien (AGBP)
Lise LEROUX, membre du comité scientifique

3.4.2 Responsabilités dans les instances scientifiques et techniques

INSTITUTIONS

Aéroclub de France
. Commision « patrimoine aéronautique »
Didier BRISSAUD, membre

Association des géologues du bassin de Paris
Lise LEROUX, membre du conseil d'administration

Centre français de l'anticorrosion (CEFRACOR)
. Commission « pierre-durabilité »
Ann BOURGÈS, Lise LEROUX, Jean-Didier MERTZ, membres actifs
. Commission « construction-bâtiment » et sous-commission « inhibiteurs de corrosion »
Élisabeth MARIE-VICTOIRE membre actif
. Commission « peinture »
Annick TEXIER, membre actif

Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine (CICRP)
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du conseil scientifique

Centre de recherche et de restauration des musées de France
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du conseil scientifique

Comité français du Corpus Vitrearum
Fanny BAUCHAU, membre
Claudine LOISEL, membre
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre

Comité scientifique international pour la conservation des vitraux (ICOMOS-Corpus Vitrearum)
Fanny BAUCHAU, membre associé
Claudine LOISEL, membre expert
Isabelle PALLOT-FROSSARD, présidente

Fondation des sciences du patrimoine
Vincent DETALLE, membre du conseil scientifique
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du conseil d'administration

ICOM, comité de conservation « glass and ceramics »
Claudine LOISEL, membre actif

Initiative de programmation conjointe sur le patrimoine culturel (JPI-CH)
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du conseil scientifique

Institut national du patrimoine
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du conseil scientifique

LabEx Matisse
Isabelle Pallot-Frossard, membre du comité de pilotage
Élisabeth Marie-Victoire, membre du comité de pilotage de l'axe 3 « Interfaces, transport et réactivité »

LabEx Patrima
Isabelle Pallot-Frossard, membre du comité de pilotage

Ministère de la Culture et de la Communication
Commission nationale des monuments historiques (CNMH)
. Section Travaux et abords
Isabelle Pallot-Frossard, personnalité qualifiée
. Section grottes ornées
Isabelle Pallot-Frossard, personnalité qualifiée

Musée du Louvre
Isabelle Pallot-Frossard, membre de la commission de restauration

Musée Rodin
Annick Texier, membre de la commission de la conservation et des restaurations

Oxymore – Réseau d'excellence francilien sur les matériaux oxydes, Conseil régional d'Île-de-France
Isabelle Pallot-Frossard, membre du comité de pilotage

Communauté d'universités et établissements Université Paris-Est (COMUE PARIS-EST)
Isabelle Pallot-Frossard, membre du conseil d'administration

Réseau international des fontes d'art (RIFA),
Annick Texier membre actif du comité de pilotage et du comité scientifique

SITES

ALTAMIRA — Grotte d'Altamira (Espagne)
Isabelle Pallot-Frossard, membre du conseil scientifique

ALBI — Cathédrale Sainte-Cécile
Isabelle Pallot-Frossard, membre du comité scientifique

AMBOISE — Fontaine Max Ernst
Annick Texier, membre du comité scientifique de restauration

AVIGNON — Palais des Papes (Chapelle Saint-Martial)
Isabelle Pallot-Frossard, membre du comité scientifique

BEAUVAIS — Cathédrale Saint-Pierre
Annick Texier membre du comité scientifique de la restauration des couvertures

CHARTRES — Cathédrale Notre-Dame
Claudine Loisel, membre du comité scientifique
Isabelle Pallot-Frossard, membre du comité scientifique

FONTAINEBLEAU — Château (Salle de bal)
Isabelle Pallot-Frossard, membre du conseil scientifique

MILLY-LA-FORÊT — *« Le Cyclop »,* sculpture monumentale
Claudine Loisel, membre du comité scientifique de restauration pour le CNAP.
Élisabeth Marie-Victoire, membre du comité scientifique de restauration pour le CNAP.
Annick Texier, membre du comité scientifique de restauration pour le CNAP.

MONTIGNAC — Grotte de Lascaux
Isabelle Pallot-Frossard, membre du groupe maîtrise d'ouvrage
Stéphanie Touron, membre du groupe maîtrise d'ouvrage

PARIS (6e) Église Saint-Germain des Prés
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du comité scientifique

REIMS Cathédrale Notre-Dame
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du comité scientifique

SAINT-DENIS Cathédrale Saint-Denis
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du comité scientifique

TROYES Cité du vitrail
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du conseil scientifique

TULLE Cathédrale Notre-Dame
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du conseil scientifique
Vincent DETALLE, membre du conseil scientifique
Stéphanie TOURON, membre du conseil scientifique

3.4.3 Normalisation

AFNOR, commission de normalisation « Conservation des biens culturels » :

WG 1 Recommandations générales et terminologie
Élise LEBOUCHER, membre actif du groupe d'experts

WG2 Évaluation de méthodes et produits de conservation
Ann BOURGÈS, membre actif du groupe d'experts

WG3 Évaluation de méthodes et produits pour les travaux de conservation sur les matériaux inorganiques poreux constitutifs du patrimoine culturel
Ann BOURGÈS, membre actif du groupe d'experts

WG3 Échantillonnage
Didier BRISSAUD, membre actif du groupe d'experts

WG4 Protection des collections
Dominique DE REYER, animatrice et coordinatrice du groupe d'experts

WG7 Spécification et mesure des climats intérieur et extérieur et Mesures de la teneur en eau de matériaux constituant un patrimoine culturel matériel et immatériel
David GIOVANNACCII, membre actif du groupe d'experts

WG11 Processus de conservation
Stéphanie CELLE, membre actif du groupe d'experts

WG-BIO Gestion des risques biologiques
Dominique DE REYER, animatrice et coordinatrice du groupe d'experts

3.4.4 Groupes de travail

Ministère de la Culture et de la Communication, secrétariat général,
« Évaluation de la politique publique de numérisation des ressources culturelles », groupe de travail "secteur patrimoine"
Élise LEBOUCHER, membre

Ministère de la Culture et de la Communication, direction générale des patrimoines.
Groupe de travail transversal « conservation-restauration »
- Portail documentaire Conservation-restauration des biens culturels
- Brochure destinée aux élus : sensibilisation à la conservation-restauration
- Journées d'études professionnelles

Élise LEBOUCHER, membre actif

Ministère de la culture et de la communication
- *« Manuel de bonne conduite pour les sites d'art rupestre », comité de pilotage sous-direction de l'archéologie et LRMH*

Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre
Stéphanie TOURON, membre et secrétaire

- *« Plan de gestion UNESCO pour les sites de la vallée de la Vézère »*
  Stéphanie TOURON,
  Stéphanie CELLE, membres
- *« Récolement de la documentation des sites préhistoriques en Aquitaine »*
  Stéphanie CELLE, membre
  Stéphanie TOURON, membre
- *Site internet « les abris sculptés du magdalénien »*
  Stéphanie TOURON, membre du comité scientifique

Section française de l'Institut international de conservation
- *Groupe de travail « Bois »*
  Emmanuel MAURIN, coordinateur
- *Groupe de travail « Textile »*
  Dominique DE REYER, coordinatrice
- *Groupe de travail « Pierre-plâtre-terre »*
  Lise LEROUX, coordinatrice

3.4.5 Activités éditoriales

Applied physic A
Vincent DETALLE, reviewer

Applied physic A
Vincent DETALLE, reviewer

Archaeometry (Wiley)
Lise LEROUX, reviewer

Coré
Dominique DE REYER, coordinatrice du comité de rédaction

Construction & Building Materials
Élisabeth MARIE-VICTOIRE, reviewer
David GIOVANNACCI, reviewer

Journal Applied Physics
Lise LEROUX, reviewer

Journal of Archaeological Science
Lise LEROUX, reviewer

Journal of cultural heritage
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du comité éditorial
Ann BOURGÈS, reviewer

Lettre d'information du LRMH
Isabelle PALLOT-FROSSARD, directeur de la publication
Stéphanie CELLE, rédacteur en chef

Materials characterization
Jean-Didier MERTZ, reviewer

Monumental
Isabelle PALLOT-FROSSARD, membre du comité de rédaction

Spectro Chemica Acta B
Vincent DETALLE, reviewer

Studies in conservation,
Véronique VERGÈS-BELMIN, membre du comité éditorial

AIGUEZES (30, Gard)	**Grotte aux points**	Suivi sanitaire GO/14/18/STN/FBA/AFS/SNE – 30/07/2014 – FD 14-0018	*Grottes ornées* *Microbiologie*
ALBI (81, Tarn)	**Cathédrale Sainte-Cécile** *Clôture du chœur des chanoines*	Étude de polychromie PM/14/07/VDE/DMS/ESM – 31/07/2014 – FD 14-0089	*Peintures murales et polychromie*
ALÈS (30, Gard)	**Musée Pierre André Benoît** *Quatre toiles peintes de Francis Picabia et Piero Manzoni- Ateliers de restauration du C2RMF (Versailles)*	Présence de recouvrements suspects. MI/13/16/AFS/RH - 04/10/2013 – FD 13-0096	*Microbiologie*
AMIENS (80, Somme)	**Cathédrale Notre-Dame** *Façade occidentale*	Avis sur dossier de consultation des entreprises P/14/12/VVB/ESM – 02/05/2014 – FD 14-0037	*Pierre*
ANGERS (49, Maine-et-Loire)	**Château d'Angers** *Chapelle du Logis royal.* *Baie D. Vitraux (XVe siècle)*	Constat d'état V/13/04/CLL/ESM - 13/05/2013 –FD 13-0026	*Vitrail*
	Cathédrale Saint-Maurice *Portail occidental*	Protocole d'intervention pierre/ciment romain et métal P/14/15/ABS/ESM – 26/06/2014 – FD 1260188	*Pierre*
ARGENTEUIL (95, Val d'Oise)	**Abbaye Notre-Dame** *Vestiges et façade de la chapelle Saint-Jean*	Détermination des pierres et des mortiers, et protocole d'intervention (complément d'analyse) P/13/04/ABS/ESM - 15/02/2013 – FD 12-0163	*Pierre*
ARLES (13, Bouches-du-Rhône)	**Église Saint-Trophime** *Cloître* *Chapiteaux des galeries est et sud*	Résultats préliminaires de l'étude à la loupe binoculaire des écailles prélevées sur les chapiteaux lors des dégagements au scalpel des couches non adhérentes P/14/04/VVB/ESM/RH – 27/02/2014 – FD 14-0011	*Pierre*
	Cloître	Compte rendu de visite sur le chantier de restauration P/14/08/VVB/PHB/ESM – 11/03/2014 – FD 14-0036	
AUCH (32, Gers)	**Cathédrale Sainte-Marie** *Restauration des parties basses du massif occidental*	État d'altération et préconisations de conservation des parties sculptées P/13/17/JDM/ESM - 24/06/2013 – FD 13-0025 Traitement en conservation des parties sculptées P/13/22/JDM/ESM - 07/12/2013 – FD 13-0171	*Pierre*
AUXERRE (89, Yonne)	**Cathédrale Saint-Étienne** *Chapelle côté sud dite « du Trésor »*	Identification de l'infestation d'une vitrine du Trésor MI/14/08/FBA/AFS/ESM – 12/0/2014 – FD 14-0014	*Microbiologie*
AVENTIGNAN (65, Haute-Pyrénées)	**Grottes de Gargas**	Évaluation des zones et temps de traitement des algues par les UVc GO/MI/14/01/STN/FBA/ESM/RH – 03/02/2014 – FD 13-0182	*Grottes ornées* *Microbiologie*
AVIGNON (84, Vaucluse)	**Palais des Papes** *Chapelle Saint-Martial*	Conservation préventive – Avis sur les mesures à prendre PM/14/04/VDE/DMS/ESM – 02/05/2014 – FD 14-0053	*Peintures murales et polychromie*
AZAY-LE-RIDEAU (37, Indre-et-Loire)	**Château** Plaque de faîtage et épis de faîtage	M/13/03/ATR/MBU/ESM - 18/10/2013 – FD 13-0103	*Métal* *Béton*
BESANÇON (25, Doubs)	**Cathédrale Saint-Jean**	Mode opératoire nettoyage des sols en marbre P/13/21/ABS/RH - 18/09/2013 – FD 13-0054	*Pierre*
	Cathédrale Saint-Jean et Saint-Étienne	Remise à jour du contenu scientifique de l'étude sur la pathologie des matériaux dans le chevet du Saint-Suaire P/14/11/JDM/ESM – 16/04/2014 – FD 14-0034	*Pierre*

BLANDY-LES-TOURS (77, Seine-et-Marne)	**Château**	Contrôle climatique de la salle d'exposition permanente du château T/14/02/DDR/RH – 13/03/2014 – FD 10-0005	*Textile*
BORDES-SUR-LEZ (LES) (09, Ariège)	**Église Saint-Pierre d'Ourjout** *Chœur*	Étude des peintures murales PM/14/05//VDE/DMS/ESM – 20/05/2014 – FD 13-0185	*Peintures murales et polychromie*
BOURGET (LE) (93, Seine-Saint-Denis)	**Musée de l'Air et de l'espace** *Statues et bas-reliefs de l'ancienne aérogare de Labro*	Diagnostic et préconisation de conservation P/14/01/JDM/ESM – 07/01/2014 – FD 13-0175	*Pierre*
BOURRON-MARLOTTE (77, Seine-et-Marne)	**Château** *Escalier d'honneur hors-œuvre*	P/13/01/VVB/AT/ESM - 10/01/2013 – FD 12-0157	*Pierre* *Métal*
BUGUE (LE) (24, Dordogne)	**Grotte du Sorcier**	Suivi sanitaire GO/13/06/STH/RHE - 08/08/2013 – FD 13-0064	*Grottes ornées*
		Suivi sanitaire GO/14/08/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 10/06/2014 – FD 13-0153	*Grottes ornées* *Microbiologie*
CAMBRAI (59, Nord)	**Château de Selles**	Caractérisation de sels et protocole pour la conservation des graffitis P/13/15/VVB/STN/FBA/RH - 03/06/2013 - FD13-0044	*Pierre* *Grottes ornées* *Microbiologie*
CALAIS (62, Pas-de-Calais)	**Église Notre-Dame** *Retable*	Provenance de l'albâtre GE/14/01/LL/ESM - 14/01/2014 – FD 13-0167	*Pierre*
CAYENNE (973, Guyane)	**Les Roches du Mahury**	Avis sur rapport envoyé au LRMH GO/13/09/STN/FBA/RHE – 12/12/2013 – FD 13-0178	*Grottes ornées* *Microbiologie*
	Île Saint-Joseph *Pointe Marie-Galante*		
CHAIZE-LE-VICOMTE (LA) (84, Vendée)	**Église Saint-Nicolas**	Conservation des chapiteaux Avis sur protocole de restauration P/14/02/JDM/ESM – 03/03/2014 – FD 14-0012	*Pierre*
CHARTRES (28, Eure-et-Loir)	**Cathédrale Notre-Dame** *Voûtes de la croisée du transept*	Identification des matériaux en œuvre GE/13/26/LL/ESM - 28/06/2013 – FD 13-0013	*Pierre*
	Clôture du chœur *(XVIe –XVIIIe siècles)*	Identification des matériaux en œuvre GE/14/04/LL/ESM - 10/02/2014 – FD 14-0009	
	Vitraux - Baie 116 *(XIIIe siècle)*	V/13/01/IPF/CLL/ESM - 22/02/2013 – FD 13-0016	*Vitrail*
		Analyse critique du DOE V/14/01/CLL/IPF/ESM – 21/01/2014 – FD 14-0001	
	Nef - Baies hautes. Baie 131 *(XIIIe siècle)*	Analyse de dépôts V/13/11/CLL/FBU/ESM - 22/10/2013 - FD 13-0121	
CHATEAUBRIANT (44, Loire-Atlantique)	**Château** *Donjon (XIVe siècle sur des fondations du XIe siècle)*	Avis sur le grès roussard proposé pour la substitution GE/13/10/LL/ESM - 14/02/2013 – FD 12-0218	*Pierre*
CHISSEY-SUR-LOUE (39, Jura)	**Église Saint-Christophe**	Assistance à l'établissement du cahier des charges pour la consultation des laboratoires d'analyses et avis sur le projet de conservation P/13/20/JDM/ESM - 09/09/2013 – FD 13-0079	*Pierre*
CLION-SUR-SEUGNE (17, Charente-Maritime)	**Église Saint-André** *Portail sculpté*	Avis sur protocole de restauration P/14/05/JDM/ESM – 20/02/2014 – FD 14-0010	*Pierre*
COLLIAS (30, Gard)	**Grotte Bayol**	Suivi sanitaire GO/14/17/STN/FBA/AFS/SNE – 15/07/2014 – FD 14-0021	*Grottes ornées* *Microbiologie*
CONCHES-EN-OUCHE (27, Haute-Normandie)	**Musée municipal** *Vitrail* La Piété *de François Décorchement*	Conseil pour l'élaboration du protocole de nettoyage V/13/07/CLL/FBU/ATR/EMV/ESM - 16/07/2013 – FD 13-0090	*Vitrail* *Métal* *Béton*
		Préconisations pour la restauration V/13/12/CLL/FBU/AT/EMV/ESM - 21/11/2013 – FD 13-0090	

COUILLY PONT-AUX-DAMES (77, Seine-et-Marne)	**Église Saint-Georges** *Vierge à l'Enfant (XIVe siècle ? XIXe siècle ?)*	Identification de la pierre GE/13/22/LL/ESM - 10/06/2013 –FD 13-0076	*Pierre*
DOMME (24, Dordogne)	**Grotte du Mammouth**	Identification des dépôts noirs GO/13/08/STN/RHE- 09/08/2013 – FD 13-0067	*Grottes ornées*
		Bilan sanitaire GO/14/12/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 11/06/2014 – FD 13-0151	*Grottes ornées Microbiologie*
	Grotte du Pigeonnier	Bilan sanitaire GO/14/09/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 10/10/2014 – FD 13-0152	*Grottes ornées Microbiologie*
DONZENAC (19, Corrèze)	**Église Saint-Laurent**	Suivi climatique de la vitrine-trésor MI/13/09/FBA/DDR/ESM - 23/07/2013 – FD 13-0094	*Microbiologie Textile*
DURANVILLE (27, Eure)	**Église de Duranville** *Vitrail de François Décorchemont*	V/14/08/CLL/EMV/ESM – 12/05/2014 – FD 14-0060	*Vitrail Béton*
ENGHIEN-LES-BAINS (95, Val d'Oise)	**Église** *Façade occidentale, dôme nord, colonnette*	Identification de la pierre en œuvre GE/13/14/LL/ESM - 26/04/2013 – FD 13-0064	*Pierre*
EYZIES DE TAYAC (LES)-SIREUIL (24, Dordogne)	**Abri du Cap blanc**	Bilan sanitaire GO/14/05/STN/FBA/AFS/JLP/SNE - 06/06/2014 – FD 13-0146 GO/14/15/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 07/07/2014 – FD 14-0079	*Grottes ornées Microbiologie*
	Abri Cro-Magnon	Suivi sanitaire GO/13/02/STN/RHE - 08/08/2013 – FD 13-0065	*Grottes ornées*
	Grotte de Combarelles	Identification des dépôts blancs GO/13/01/STN/RHE - 06/08/2013 – FD 13-0069	
		Suivi sanitaire GO/14/13/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 12/06/2014 – FD 13-0147	*Grottes ornées Microbiologie*
	Grotte de Font de Gaume	Identification des dépôts blancs GO/13/03/STN/RHE - 08/08/2013 – FD 13-0070	*Grottes ornées*
		Suivi sanitaire GO/14/14/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 12/06/2014 – FD 13-0168	*Grottes ornées Microbiologie*
	Grotte de la Mouthe	Bilan sanitaire GO/13/04/STN/RHE - 08/08/2013 – FD 13-0066	*Grottes ornées*
		Bilan sanitaire GO/14/07/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 10/06/2014 – FD 13-0150	*Grottes ornées Microbiologie*
ESCHENTZWILLER (68, Haut-Rhin)	**Église Saints Pierre-et-Paul**	Protocole de restauration des pierres de taille de la tour P/13/16/JDM/ESM - 18/06/2013 - 13-0051	*Pierre*
FONTAINEBLEAU (77, Seine-et-Marne)	**Château** *Boudoir turc (XVIIIe siècle)*	Préconisations relatives au nettoyage de la polychromie PM/13/04/DMS/SDE/VDE/BTU/ESM - 01/03/2013 – FD 12-0227	*Peintures murales et polychromie*
FONTENAY-EN-PARISIS (95, Val d'Oise)	**Église Saint-Aquilin** *Façade occidentale et chapelle des fonts baptismaux Mortiers des maçonneries*	Identification de la pierre en œuvre GE/13/11/LL/ESM - 18/02/2013 – FD 13-0022	*Pierre*
GARN (LE) (30, Gard)	**Grotte de la Baume d'Oulen**	Suivi sanitaire GO/14/11/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 11/06/2014 – FD 14-0019	*Grottes ornées Microbiologie*
GLUX-EN-GLENNE (58, Nièvre)	**Site archéologique de Bibracte**	Évaluation de consolidation de coupes stratigraphiques P/13/02/ABS/ESM - 29/01/2013 – FD 12-0190	*Pierre*
HAUTE-ISLE (95, Val d'Oise)	**Église Notre-Dame de l'Annonciation**	Étude de la contamination biologique MI/13/08/FBA/AFS/ESM - 27/05/2013 – FD 13-0029	*Microbiologie*

HOLDUS (Norvège)	**Église de Holdus**	Identification de la pierre GE/13/13/LL/ESM - 22/04/2013 – FD 13-0018	*Pierre*
KOUROU (973, Guyane)	**La Carapa**	Rapport envoyé au LRMH GO/13/09/STN/FBA/RHE – 12/12/2013 – FD 13-0178	*Grottes ornées* *Microbiologie*
LAMOTTE-WARFUSÉE (80, Somme)	**Église Saint-Pierre**	Restauration du clocher BE/13/01/EMV/ESM - 21/05/2013 – FD 13-0081	*Béton*
LANGRES (52, Haute-Marne)	**Cathédrale Saint-Mammès** *Chapelle de la Sainte-Croix* *Ensemble sculpté représentant la Vierge et l'Enfant, saint Mammès et Guy Baudet en prière (1341)*	Identification de la pierre en œuvre GE/13/32/LL/ESM - 25/11/2013 – FD 13-0158	*Pierre*
LAON (02, Aisne)	**Cathédrale Notre-Dame** *Tribune* *Dépôt lapidaire provenant de l'ancienne église paroissiale Saint-Remi de Cerny-en-Laonnais (fin XIe – début XIIe siècle)*	Identification de la pierre en œuvre GE/14/06/LL/ESM – 22/05/2014 – FD 14-0056	*Pierre*
LARMOR BADEN (56, Morbihan)	**Cairn de Gravr'inis**	Constat d'état et conseils pour le suivi climatique P/13/23/VVB/FBA/STN/ESM - 09/12/2013 – FD 10-0110 et 13-0126	*Pierre* *Grottes ornées* *Microbiologie*
		Visite des 24 et 25 juin 2014. Constat d'état, prélèvements et mesures climatiques P/14/16/VVB/STN/FBA/SNE – 15/07/2014 – FD 14-0082	
LES LILAS (93, Seine-Saint-Denis)	**Musée national de la Marine** *Fort de Romainville*	Étude de la contamination fongique MI/13/02/FBA/GT - 31/01/2013 – FD 12-0209	*Microbiologie*
LUÇON (85, Vendée)	**Cathédrale Notre-Dame de l'Assomption**	Étude sur le développement de basidiomycètes MI/14/07/FBA/ESM - 12/05/2014 – FD 14-0057	*Microbiologie*
LYON (69, Rhône)	**Cathédrale Saint-Jean** *Baies hautes du chœur - Vitraux*	Restauration V/13/02/CLL/FBU/ESM - 21/01/2013 – FD 12-0204	*Vitrail*
	Musée des Beaux-Arts de Lyon	Présences de recouvrements fongiques sur des panneaux en bois MI/14/05/FBA/AFS/ESM - 15/04/2014 – FD 14-0033	*Microbiologie*
MARTYRE (LA) (29, Finistère)	**Église Saint-Salomon** *Portail*	Conseil en conservation/restauration P/14/09/ABS/ESM – 04/04/2014 – FD 13-0166	*Pierre*
MERLÉAC (22, Côte-d'Armor)	**Chapelle Saint-Jacques**	Identification de la matrice organique utilisée pour créer un relief PM/13/13/BTU/RHE - 15/10/2013 – FD 13-0112	*Peintures murales et polychromie*
METZ (57, Lorraine)	**Église Notre-Dame** *Vitrail, baie 133, nef côté nord*	Analyse de peinture V/13/08/CLL/FBU/ESM - 02/09/2013 – FD 13-0106	*Vitrail*
MONTIGNAC (24, Dordogne)	**Grotte de Lascaux**	Analyses de contamination fongique MI/13/01/GO/AFS/GT - 10/01/2013 – FD 12-0208	*Microbiologie*
MONTPELLIER (34, Hérault)	**Palais de Justice** *Grille d'honneur*	Avis sur devis de restauration M/14/01/AT/ESM – 14/02/2014 – FD 14-0026	*Métal*
MOUTIERS-LES-MAUXFAITS (85, Vendée)	**Église Saint-Jacques** *Façade occidentale* *(fin XIIe siècle)*	Avis sur le granite proposé à la substitution GE/13/04/LL/ESM - 22/01/2013 – FD 12-0216	*Pierre*
NANTEUIL-LE-HAUDOUIN (60, Oise)	**Église Saint-Pierre** *Façade occidentale*	Identification des pierres - Proposition de substitution GE/13/30/LL/ESM - 23/09/2013 –FD 13-0123	*Géologie*
NEUFCHATEAU (88, Vosges)	**Église Saint-Nicolas** *Groupe sculpté de la* Mise au Tombeau	Identification de la pierre en œuvre État de conservation P/13/03/ABS/LL/ESM - 19/02/2013 – FD 12-0150	*Pierre*
NEVERS (58, Nièvre)	**Cathédrale Saint-Cyr - Sainte-Julitte** *Jubé (XIVe siècle)*	Identification de la nature des pierres Analyse partielle des traces d'outils GE/13/08/LL/ESM - 11/02/2013 - 10-0186	*Pierre*

NICE (06, Alpes-Maritimes)	**Domaine de Valrose** *Fontaine au Cygne*	Restauration de la fontaine au Cygne	*Métal*
ORSCHWILLER (67, Bas-Rhin)	**Château du Haut-Koenigsbourg**	Origine des désordres sur pavés en grès P/13/14/JDM/ESM - 31/05/2013 – FD 13-0071	*Pierre*
OULCHES-LA-VALLÉE-FOULON (02, Aisne)	**Caverne du Dragon**	Bilan sanitaire et aménagement GO/13/09/STN/FBA/ESM - 05/12/2013 – FD 13-0172 Suivi sanitaire et climatique GO/MI/14/03/STN/FBA/RH – 24/02/2014 – FD 14-0004	*Grottes ornées* *Microbiologie*
PARIS 1er (75, Ile-de-France)	**Colonne Vendôme**	Étude préalable à la restauration M/13/01/ATR/MBU/ESM - 15/07/2013 - 12-0236	*Métal*
	Musée du Louvre *Département des objets d'art* *Appartement Napoléon III*	Présence de taches brunâtres sur de la feutrine de l'appartement Napoléon III MI/13/15/AFS/RH - 11/09/2013 – FD 13-0049	*Microbiologie*
	Plafond de la réserve des antiquités égyptiennes	Présence de taches brunâtres et rosâtres au niveau du plafond de la réserve des antiquités égyptiennes MI/14/02//FBA/AFS/RH - 17/02/2014 – FD 13-0115	
	Département des des sculptures *Tête de sainte Marie-Madeleine (RF 1456)*	Identification de la pierre en œuvre GE/13/09/LL/ESM - 12/02/2013 – FD 13-0019	*Pierre*
	Département des antiquités égyptiennes, section copte	Identification de fibres T/14/01/DDR/ESM – 09/01/2014 – FD 13-180	*Textile*
	Palais de Justice *Bâtiment Tournaire, quai des Orfèvres – 1911-1913* *Façades*	Aide au choix de restauration des parements GE/14/03/LL/ESM - 01/02/2014 – FD 14-0013	*Pierre*
	Palais du Louvre *Pavillon de Marsan* *(XIXe siècle)* *Façade nord, rue de Rivoli*	Avis sur la pierre de substitution – Nettoyage P/14/03/VVB/LL/ESM – 14/02/2014 – FD 14-0023	*Pierre*
	Palais Royal *Ministère de la culture et de la communication* *Façades côté jardin*	Identification des pierres en œuvre - Traitement de surface GE/13/16/LL/ESM - 26/04/2013 – FD 13-0019	*Pierre*
	Galerie des Proues et façade subjacente *(XVIIe, XVIIIe et XIXe siècles)*	Identification des pierres en œuvre et substitution Altération par les sels P/14/06/ABS/LL/ESM – 14/02/2014 – FD 13-0163 et 14-0031	*Pierre*
PARIS 3e (75, Ile-de-France)	**Musée Carnavalet** Vierge à l'Enfant *(inv. A.P. 141) provenant de l'ancienne abbaye de Saint-Germain-des-prés (Xve siècle)*	Identification de la pierre GE/13/15/LL/ESM - 25/04/2013 – FD 13-0034	*Pierre*
	Musée national Picasso	Évaluation de la contamination fongique MI/13/05/FBA/RH - 03/06/2013 – FD 13-0039	*Microbiologie*
PARIS 4e (75, Ile-de-France)	**Hôtel Lambert**	Préconisations suite à l'incendie du 10 juillet 2013 MI/13/10/FBA/ESM - 12/07/2013	*Microbiologie*
		Mesures préventives à prendre après sinistre MI/13/12/FBA/EMN/ESM – 17/07/2013 - FD 13-0100	
		Mesures de décontamination à prendre MI/13/13/IPF/FBA/ESM - 22/07/2013 – FD 13-0100	
		Nettoyage des pierres et stucs Préconisation d'urgence post-incendie P/13/20/ABS/RH - 05/08/2013 – FD 13-0108	*Pierre*

		Nettoyage des pierres et stucs/contamination en sels solubles Analyses et recommandations P/13/21/ABS/ESM - 22/12/2013 - 13-0125	
		Nettoyage/Contamination en sels des peintures/Étude des pigments PM/13/12/DMS/RHE - 07/10/2013 – FD 13-0135	*Peintures murales et polychromie*
		Étude des altérations de pigments du Cabinet des bains PM/13/15/DMS/RHE - 21/10/2013 – FD 13-0138	
		Évaluation traitement biocide MI/14/05/FBA/JLT/RHE - 04/04/2014 – FD 14-0005	*Microbiologie*
	Mémorial des martyrs de la Déportation	Avis sur nettoyage BE/13/03/EMV/RH - 12/12/2013 – FD 13-0169	*Béton*
	Sainte-Chapelle *Archange du chevet*	Restauration M/13/02/ATR/MBU/ESM - 22/10/2013 - 13-0130	*Métal*
PARIS 5e (75, Ile-de-France)	**Thermes et hôtel de Cluny - Musée national du Moyen Age** *Statue d'Adam (vers 1260)-Inv. Cl. 11657*	Identification des pierres en œuvre GE/13/25/LL/ESM - 18/06/2013 – FD 13-0083	*Pierre*
	Statue acéphale (seconde moitié du XIIIe siècle) Inv. Cl. 23881	Identification de la pierre GE/13/28/LL/ESM - 03/07/2013 – FD 13-0091	
PARIS 6e (75, Ile-de-France)	**Ancien couvent des Carmes, actuellement Institut catholique de Paris** *Cour atrium (ancienne cour d'officines), cour d'honneur, grand cloître – façades (XVIIe siècle)*	Identification de la pierre en œuvre - Substitution GE/14/05/LL/ESM - 30/04/2014 – FD 14-0054	*Pierre*
PARIS 7e (75, Ile-de-France)	**Assemblée nationale**	Données pétrophysiques pour le choix de la pierre de substitution GE/13/21/LL/ESM - 07/06/2013 – FD 13-0074	*Pierre*
	Hôtel de Salm *Grande Chancellerie de la Légion d'honneur*	Avis sur l'état d'altération d'un bas-relief en stuc P/13/15/JDM/ESM - 07/06/2013 – FD 13-0073	*Pierre*
	Hôtel Kinski *Chapelle, oratoire. Vitraux (XVIe siècle)*	Analyse de dépôts V/13/03/CLL/FBU/ESM - 22/02/2013 – FD 12-0211	*Vitrail*
PARIS 8e (75, Ile-de-France)	**Musée Cernuschi** *Institut national du patrimoine*	Objet de mémoire en arts textiles T/14/05/DDR/ES - 18/06/2014 – FD 14-0073	*Textile*
PARIS 9e (75, Ile-de-France)	**Opéra de Paris** *Palais Garnier* *Façade ouest - Rampe de l'Empereur (XIXe siècle)*	Substitution de pierre GE/13/02/LL/ESM- 08/01/2013 – FD 12-0223	*Pierre*
		Restauration des colonnes en granite P/13/06/JDM/ESM - 22/03/2013 – FD 13-0027	
	Façade nord - Cour de l'administration (XIXe siècle)	Identification des pierres en œuvre – Substitutions GE/13/20/LL/ESM - 07/06/2013 - 13-0072	
PARIS 11e et 12e (75, Ile-de-France)	**Place de la Nation** *Pavillon de l'octroi (XVIIIe siècle)*	Identification des pierres Nature des enduits en faux appareils P/13/11/VVB/LL/RH - 31/05/2013 – FD 13-0014	*Pierre*
PARIS 16e (75, Ile-de-France)	**Église Saint-Pierre de Chaillot** *Baie 104, vitrail,*	Conseils pour l'élaboration du cahier des charges de la restauration V/14/03/CLL/ATR/ESM – 09/04/2014 – FD 13-0177	*Vitrail* *Métal*
	Musée d'art moderne de la ville de Paris *Exposition « Apartés »*	T/13/05/DDR/RH - 13/12/2013 – FD 13-0087	*Textile*

	Exposition « Decorum »	Suivi du traitement de désinsectisation des tapisseries T/14/04/DDR/ESM - 09/04/2014 – FD 13-0088	
	Palais de Chaillot *Grand foyer du théâtre national de Chaillot*	Identification d'une couche de finition sur marbre Constat d'état P/13/10/JDM/DBD - 15/05/2013 – FD 13-0031	*Pierre*
	Maisons La Roche-Jeanneret	Propositions de mortiers par les entreprises Vieujot, Amonit, CESA et PAREX GROUP P/13/09/VVB/ESM - 16/04/2013 – FD 12-0199 Détermination de la nature et de la taille de charge du mortier cimentaline P/13/12/VVB/ESM - 07/05/2013 – FD 13-0046	*Pierre*
		Identification des substrats et finitions B/14/01/EMV/MBU/ESM – 20/01/2014 – FD 12-0199	*Béton*
PARIS 18e (75, Ile-de-France)	**Piscine des Amiraux**	Avis sur traitement par protection cathodique B/13/04/EMV/RH – 27/12/2013 – FD 13-0179	*Béton*
POISSY (78, Yvelines)	**Villa Savoye** *Loge du jardinier – 1er étage*	Caractérisation de la polychromie d'origine PM/14/06/VDE/DMS/ESM – 10/07/2014 – FD 14-0081	*Peintures murales et polychromie*
POITIERS (86, Vienne)	**Chapelle Saint-Louis** *Façade principale*	Avis sur protocole de restauration P/14/10/JDM/ESM – 02/05/2014 – FD 14-0041	*Pierre*
	Hypogée des Dunes	Problème de contamination biologique MI/13/07/FBA/AFS/ESM - 27/05/2013 – FD 13-0053	*Microbiologie*
PONTOISE (95, Val d'Oise)	**Cathédrale Saint-Maclou**	Protocole pour le traitement des coulures d'oxydes de fer P/14/14/JDM/ESM – 16/06/2014 – FD 14-0072	*Pierre*
	Nef, baie nord *Vitraux (XVIe siècle)*	Mise en place de la verrière de protection V/14/06/CLL/ESM – 02/05/2014 – FD 14-0055	*Vitrail*
	Baies sud 10, 12, 14, 16, 18, 20 et 22 *Vitraux (XIXe siècle)*	Projet de restauration V/14/09/CLL/ESM – 28/05/2014 – FD 14-0066	
PRIGNAC-ET-MARCAMPS (33, Gironde)	**Grotte de Pair-Non-Pair**	Suivi climatique et analyse de pigments GO/13/05/STN/RHE - 08/08/2013 – FD 13-0075	*Grottes ornées*
		Bilan sanitaire GO/14/06/STN/FAB/AFS/JLP/SNE – 06/06/2014 – FD 13-0149	*Grottes ornées* *Microbiologie*
REIMS (51, Marne)	**Église Saint-Nicaise** *Vitraux de René Lalique*	Conseil pour la dépose des baies V/14/07/CLL/ATR/ESM – 16/05/2014 – FD 14-0058	*Vitrail* *Métal*
	Porte de Mars	Descriptif de l'accompagnement scientifique par le LRMH P/13/13/JDM/ESM - 21/05/2013 – FD 13-0040	*Pierre*
		Projet de restauration Cahier des charges du lot « laboratoire » P/13/18/JDM/ESM - 08/07/2013 – FD 13-0089	
RÉMIRE-MONTJOLY (973, Guyane)	**Abattis Willie** **Grand Beauregard sud** **Roche Palulu** **Le serpent de Pascaud**	Rapport envoyé au LRMH GO/13/09/STN/FBA/RHE – 12/12/2013 – FD 13-0178	*Grottes ornées* *Microbiologie*
RENNES (35, Ille-et-Vilaine)	**Écomusée du pays de Rennes** *Voiture hippomobile : la Victoria*	Présence suspecte de moisissures MI/13/03/FBA/AFS/RH - 19/03/2013 – FD 13-0030	*Microbiologie*
ROCHELLE (LA) (17, Charente-Maritime)	**Hôtel de Ville**	Mesures préventives à prendre après sinistre MI/13/14/FBA/ESM - 23/07/2013 – FD 13-0105	*Microbiologie*
	Tour de la lanterne	Relevé 3D et conservation des graffitis P/13/24/VVB/ESM - 10/12/2013 – FD 13-0027	*Pierre*

ROMANS-SUR-ISÈRE (26, Drôme)	**Musée international de la Chaussure de Romans** *Objet à l'étude à l'Institut national du patrimoine*	Objet de mémoire en arts textiles T/14/06/DDR/SNE - 18/06/2014 – FD 14-0067	*Textile*
SAINT-DENIS (93, Seine-Saint-Denis)	**Cathédrale Saint-Denis** *Façade occidentale, portail nord et élévation subjacente*	Information sur les types de pierres en œuvres GE/13/03/LL/ESM - 10/01/2013 – FD 12-0222	*Pierre*
	Baie 57, vitrail, XIIIe – XIXe siècle	Conseil pour l'élaboration du protocole de nettoyage de la face externe V/13/09/CLL/ATR/ESM - 03/09/2013 – FD 13-0133	*Vitrail* *Métal*
SAINTE-ANASTASIE (30, Gard)	**Baume Latrone**	Suivi sanitaire GO/14/16/STN/FBA/AFS/SNE – 11/07/2014 – FD 14-0020	*Grottes ornées* *Microbiologie*
SAINT-JEAN-DE-MAURIENNE (73, Savoie)	**Cathédrale** Mise au tombeau *(peinture murale)*	Analyse des enduits de restauration et de la couche superficielle PM/13/09/DMS/RHE - 07/10/2013 – FD 12-0239	*Peintures murales et polychromie*
SAINT-MACAIRE (33, Gironde)	**Église Saint-Sauveur-et-Saint-Martin** *Portails de la façade occidentale (XIIIe siècle)*	Documentation sur les pierres en œuvre GE/13/33/LL/ESM - 25/11/2013 – FD 13-0162	*Pierre*
SAINT-PÈRE-SOUS-VEZELAY (89, Yonne)	**Église** *Culée d'arc-boutant sud de la nef reconstruit par Viollet-le-Duc*	Avis sur la substitution de pierre GE/13/18/LL/ESM - 17/05/2013 – FD 13-0048	*Pierre*
SAINT-QUIRIN-LETTENBACH (57, Moselle)	**Chapelle des verriers**	Étude sur le développement de mérule MI/14/04/FBA/ESM - 01/04/2014 – FD 14-0044	*Microbiologie*
SAINT-WANDRILLE-RANÇON (76, Seine-Maritime)	**Abbaye de Fontenelle** *Cloître (XIVe-XVe siècle)*	Identification des pierres en œuvre Comparaison avec des craies issues de carrières GE/13/34/LL/ESM - 25/11/2013 – FD 13-0159	*Pierre*
SALLERTAINE (85, Vendée)	**Église Saint-Martin** *(XIIe siècle)* *Chœur, dallage et emmarchement*	Identification de la pierre – Substitution GE/13/06/LL/ESM - 28/01/2013 – FD 13-0006	*Pierre*
SÉLESTAT (67, Bas-Rhin)	**Pôle d'archéologie interdépartemental rhénan** *Gants de la 1re guerre*	T/14/07/DDR/SNE - 24/06/2014 – FD 14-0064	*Textile*
SENS (89, Yonne)	**Cathédrale Saint-Étienne** *Monument Salazar (début XVIe siècle)*	Identification des matériaux en œuvre Conseils pour la restauration GE/13/31/LL/ABS/ESM - 18/10/2013 – FD 13-0110	*Géologie* *Pierre*
	Chapelle Saint-Savinien *Baie 2, vitrail (XIIIe siècle)*	Analyses de dépôts V/14/02/CLL/FBU/ESM – 17/01/2014 – FD 13-0181	*Vitrail*
	Vitraux du transept	Conseil scientifique et technique sur l'étude et la restauration V/14/05/IPF/CLL/ESM – 16/04/2014 – FD 12-0241	
	Vitraux du chœur *Baie 2 (XIIIe siècle)*	Relecture du CCTP V/14/10/CLL/IPF/ESM – 21/10/2014 – FD 14-0117	
	Palais synodal (XIIIe siècle)	Avis sur substitution de pierre GE/13/05/LL/ESM - 24/01/2013 – FD 12-0226	*Pierre*
	Façade sud (XIIIe siècle)	Avis sur substitution de pierre GE/13/17/LL/ESM - 16/05/2013 – FD 13-0047	
SERGEAC (24, Dordogne)	**Abri Reverdit**	Bilan sanitaire GO/14/10/STN/FBA/AFS/JLP/SNE – 10/10/2014 – FD 13-0154	*Grottes ornées* *Microbiologie*
SILLÉ-LE-GUILLAUME (72, Sarthe)	**Château** *Parements*	Information sur les pierres de construction GE/13/29/LL/ESM - 05/09/2013 – FD 13-0117	*Pierre*

SONDERSDORF (68, Haut-Rhin)	**Chapelle Saint-Martin - Notre-Dame** dite Hippoltskirch	Validation du protocole de restauration PM/13/10/DMS/RHE - 07/10/2013 – FD 12-0238	*Peintures murales et polychromie*
SOUILLAC (46, Lot)	**Église Saint-Martin** *Porche et tympan roman*	Avis sur les propositions de protocoles de restauration du porche et du tympan P/13/08/VVB/ESM- 15/04/2013 – FD 13-0036	*Pierre*
STRASBOURG (67, Bas-Rhin)	**Ponts couverts**	Avis sur l'origine de l'altération des grès P/13/19/JDM/ESM 11/07/2013 – FD 13-0097	*Pierre*
TOULOUSE (31, Haute-Garonne)	**Couvent des Augustins** *Cloître*	Documentation conservée au LRMH GE/13/23/LL/ESM - 13/06/2013 – FD 13-0078	*Pierre*
	Musée d'Art moderne et contemporain – Les abbatoirs *Œuvre de Pierre Soulage (N° inv. D 1995.1.494)*	Présence de taches suspectes MI/14/09/FBA/AFS/SNE - 17/0/2014 – FD 14-0062	*Microbiologie*
TOUR BLANCHE (LA) (24, Dordogne)	**Grotte de Jovelle**	Suivi des travaux de couverture GO/13/07/STN/RHE - 08/08/2013- FD 13-0068	*Grottes ornées*
VALLON PONT D'ARC (07, Ardèche)	**Grotte Chauvet**	Présence de taches sur les passerelles métalliques MI/13/05/GO/AFS/ESM - 15/05/2013 – FD 13-0004	*Microbiologie*
		Prélèvement d'air : suivi des aérosols biologiques MI/13/11/FBA/AFS/ESM - 16/07/2013 – FD 13-0099 MI/13/17/FBA/AFS/RH - 02/09/2013 – FD 13-0114 MI/14/06/FBA/AFS/JLT/ESM - 16/04/2014 – FD 14-0152	
		Contrôle des zones moulées et passerelles GO/14/04/STN/ATR/AFS/ESM – 05/05/2014 – FD 14-0050	*Grottes ornées* *Microbiologie* *Métal*
VELARS-SUR-OUCHE (21, Côte d'Or)	**Chapelle Notre-Dame d'Étang** (XIXe siècle)	Identification de la pierre en œuvre – Substitution GE/13/19/LL/ESM - 28/05/2013 – FD 13-0056	*Pierre*
VERSAILLES (21, Côte d'Or)	**C2RMF – Ateliers de restauration** *Peintures d'Édouard Vuillard et Ker Xavier Rroussel*	Présence de recouvrements suspects sur des peintures modernes MI/14/01/FBA/AFS/ESM - 11/02/2014 – FD 13-0	*Microbiologie*
VÉZELAY (89, Yonne)	**Remparts de la maison Jules-Roy** *Coulures sur les maçonneries*	Identification de matériau GE/13/24/LL/ESM - 18/06/2013 – FD 13-0037	*Pierre*

3.5 Enseignement – Formation par recherche

3.5.1 Thèses de doctorat

Fabien Borderie
Utilisation de rayonnement UVC biocide comme alternative aux traitements chimiques dans le contrôle et l'éradication des micro-algues, cyanobactéries et champignons contaminants des milieux obscurs.
Université de Franche-Comté – Laboratoire chrono-environnement – Septembre 2011 – Novembre 2014
Faisl Bousta, co-directeur avec Badr Alaoui-Sosse

Mélanie Denecker
Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti : méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale
Université de Cergy, Laboratoire Géosciences et Environnement GEC - Octobre 2010 - Juin 2014
Ann Bourgès, co-directrice de thèse avec Ronan Hébert

Jessica Ferrand
Le phénomène de brunissement des vitraux médiévaux : critères d'identification et nature de la phase d'altération
Université Paris-Est – École doctorale SIE – Octobre 2009 – 10 Décembre 2013.
Claudine Loisel, co-encadrante avec Stéphanie Rossano (Laboratoire Géomatériaux et environnement).

Myrtille Hunault
Rôle des éléments de transition (Co, Cu) dans la coloration des verres. Application aux vitraux du Moyen Age
Université Pierre et Marie Curie (UPMC) – Paris 6, ED 397 – Septembre 2011 – 29 Septembre 2014
Suivi Claudine Loisel, Fanny Bauchau

Julie Lartigau
Caractérisation du comportement des assemblages par goujons collés dans les structures bois.
Université de Bordeaux I – Sciences physiques de l'ingénieur.
Suivi Emmanuel Maurin

Benoît Merckx
Étude et modélisation des transferts hydriques et thermiques au sein des matériaux poreux : application aux matériaux du patrimoine bâti ancien, exemple de l'Hypogée des Dunes à Poitiers et de la crypte de l'abbatiale de Saint-Savin-sur-Gartempe
Université de Poitiers, École nationale supérieure d'ingénieurs de Poitiers (ENSIP),
Jean-Didier Mertz, co-directeur avec Patrick Dudoignon

Kamel Mouhoubi
Radiométrie photothermique appliquée à la détection et à la caractérisation d'altérations structurales de peintures murales du patrimoine
Université de Reims-Champagne-Ardenne
Vincent Detalle, co-encadrant avec Jean-Luc Bodnar et Jean-Marc Vallet

Vardit Shotten-Hallel
Materials and Building Technologies In the Latin Kingdom of Jerusalem -
Hebrew University of Jerusalem, Ph.D. Thesis - Juillet 2013 – en cours
Lise Leroux, membre du comité de thèse, sous la direction du professeur Benjamin Z. KEDAR

Delphine Syvilay
Évaluation des techniques LIBS LIF RAMAN pour l'analyse des matériaux du patrimoine
Université de Cergy Pontoise. Février 2013-Février 2016
Vincent Detalle et Annick Texier, co-encadrants avec Nicolas Wilkie-Chancelier, Loic Martinez, Stéphane Serfaty

Mathilde Tiennot
Influence des propriétés physico-mécaniques des minéraux argileux dans l'altération de la pierre monumentale
Université Pierre et Marie Curie (UPMC) – Paris 6 – ED 397 – Février 2014 – Février 2017.
Ann Bourgès, directrice de thèse, Jean-Didier, encadrant.

Yolaine Tissier
UPE (Université Paris Est) - École doctorale sciences, ingénierie et environnement (SIE) – ED 531 – Octobre 2014 – Octobre 2017
Étude de l'interface acier-béton dans les processus de corrosion induits par la présence de chlorures
Élisabeth Marie-Victoire, co-encadrante

Claire Valotteau
Développement de revêtements biocides à base de biotensioactifs : application aux matériaux du patrimoine
Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - CNRS-Collège de France – 2012 -2015
Faisl Bousta, co-encadrant avec Niki Baccile et Vincent Humblot

Charlotte Walbert
Influence des conditions environnementales sur le comportement mécanique des matériaux granulaires naturels du patrimoine bâti.
Université de Cergy-Pontoise
Ann Bourgès, encadrante, Albert Noumowé, directeur de thèse.

3.5.2 Enseignements donnés

Plusieurs membres de l'équipe du LRMH contribuent à la formation et technique des futurs conservateurs, restaurateurs et scientifiques. Ils interviennent aussi dans des stages organisés par différentes institutions dans le cadre de la formation permanente.

Enseignements internationaux

LISBONNE (Portugal) - TORUN (Pologne) : Projet CHARISMA (Cours sur la conservation de la pierre)
« Introduction to conservation of cultural heritage : items, theory and practice »
Isabelle Pallot-Frossard
« Description and measurement of pore space of buildings stones » - « Properties and performances of sandstones. Hydric behaviour and clay swelling »
Jean-Didier Mertz
« Degradation in man-made constructions. Introduction to the terminology of degradation patterns. The ICOMOS glossary » - « Impact of atmospheric pollution on stone: sulphation, black crusts. Nature of natural and artificial patinas, introduction to the technology and degradation of stone polychromy » - « Desalination. Theory and working principles. Materials and application procedures. Desalination of Notre Dame la Grande, Poitiers » - « Diversity of cleaning techniques and their impact on stone surface parameters: water absorption, colour, roughness »
Véronique Vergès-Belmin

ROME (Italie) : ICCROM
7th International Course on Stone Conservation (SC11)
Cours « Desalination methods » - « Control and mitigation : poulticing » - Travaux pratiques (6h) : poulticing
Véronique Vergès-Belmin

MEXIQUE, GUATEMALA, NICARAGUA, EL SALVADOR. 26 juin au 27 juillet 2013
Ateliers de conservation en art rupestre, organisés par le ministère des Affaires étrangères et du Développement international, le CNRS et le Centre d'études mexicaines et centraméricaines (CEMCA).
Stéphanie Touron

Enseignements nationaux

ÉCOLE DE CHAILLOT
« Corrosion et anticorrosion des métaux dans les monuments historiques »
« Conservation-restauration des sculptures métalliques monumentales »
Annick Texier (3 h 30)
« Altération de la pierre »
Véronique Vergès-Belmin (4 h)
« Pathologies du béton et traitements de conservation »
Élisabeth Marie-Victoire (4 h)
« Généralités sur le bois et sa conservation »
Emmanuel Maurin (2 h)
« Consolidation de la pierre et traitements antigraffiti »
Jean-Didier Mertz (4 h)
« Peintures murales : typologie et techniques de mises en œuvre, traitements et conservation, les espaces lacunaires »
Vincent Detalle (4 h)
« Les altérations, la restauration et la protection des vitraux »
Claudine Loisel (4 h)

ÉCOLE DU LOUVRE – MUSÉOLOGIE

« La conservation des textiles »

Dominique De Reyer (1 h 30)

« Les altérations, la conservation et la restauration des vitraux »

« Les altérations, la conservation et la restauration des peintures murales »

« La conservation et la restauration des monuments historiques, le cadre administratif, financier et scientifique »

« Le rôle du LRMH dans la conservation et la restauration des monuments historiques »

Isabelle Pallot-Frossard (10 h)

« Généralités sur le bois et ses altérations »

Emmanuel Maurin (2 h)

« Les métaux : corrosion et anticorrosion »

« La restauration du métal dans les monuments historiques »

Annick Texier (6 h)

« Altération et conservation de la pierre monumentale »

Jean-Didier Mertz (4 h)

« Les traitements et la prévention des altérations biologiques »

Faisl Bousta (3 h)

INSTITUT NATIONAL DU PATRIMOINE - Département de formation des conservateurs

« Les méthodes d'éradication des agents biologiques »

Faisl Bousta (3 h 00)

Dominique De Reyer (3h00)

« La conservation-restauration des vitraux »

Claudine Loisel (2 h)

« L'organisation internationale dans le domaine de la conservation du patrimoine »

Isabelle Pallot-Frossard (1 h 30)

INSTITUT NATIONAL DU PATRIMOINE - *Département des restaurateurs*

« Coordination des enseignements scientifiques » (35 h)

« La technique du laser : principes et méthodes - application à la pierre » (6 h)

« Altération du patrimoine culturel par les sels» (3 h)

« Étude critique d'articles scientifiques » (3 h)

Véronique Vergès-Belmin

« Histoire de la restauration des vitraux »

Isabelle Pallot-Frossard (2 h)

« Essais mécaniques – matériaux dures »

Ann Bourgès (4 h)

« L'altération des vitraux – les études de cas »

Claudine Loisel (3 h 30)

« Matériaux du patrimoine textile »

TP sur l'identification des fibres (2014) (12 h)

Dominique De Reyer (3 h)

« Généralités sur le bois et ses altérations »

« Notion de xylologie »

« Altération du bois-mobilier »

« Consolidation »

Emmanuel Maurin (28 h)

« Pierre et plâtre : origine et propriétés des matériaux, morphologie des altérations et mécanismes de dégradation »

Jean-Didier Mertz (4 h)

« Activités microbiologiques et conservation des œuvres d'art »

Faisl Bousta (10 h)

« Initiation aux matériaux du patrimoine et à leurs carat éristiques : de la roche à la pierre en œuvre: géologie, propriétés physiques et comportement »

Lise Leroux (3 h)

UNIVERSITÉ PARIS I - Master de conservation-restauration des biens culturels

« Activités microbiologiques et conservation des œuvres d'art »

Faisl Bousta (10 h)

« Étude des pierres de monuments à Paris » (visite de sites)

Lise Leroux (2 h 30)

« Apport des laboratoires à la conservation-restauration des œuvres textiles »

Dominique De Reyer (1 h 30)

« Apport des laboratoires à la conservation-restauration des métaux dans les monuments historiques »

Annick Texier (1 h 30)

« Apport des laboratoires à la conservation-restauration des peintures murales »

Vincent Detalle (1 h 30)

« Pathologies des bétons et traitements de restauration/conservation »

Élisabeth Marie-Victoire (1 h 30)

« La conservation-restauration des vitraux - l'apport des laboratoires »

Claudine Loisel (1 h 30)

« Propriétés des milieux poreux et mécanismes d'altération des pierres »
Jean-Didier MERTZ (4 h)

Filière techniques générales

« Nettoyage et dessalement »
« Consolidation et hydrofugation de la pierre »
« Confortation par injection de coulis et collage »
Jean-Didier MERTZ (6 h)

UNIVERSITÉ PARIS I - PANTHÉON-SORBONNE - LAMOP, UMR8589 - *« Histoire des Techniques »*

Séminaire de recherche sur les carrières et la construction
Lise LEROUX (15 séances + une journée de terrain)

UNIVERSITÉ PARIS XII - master SGE - Spécialité MAPE - « Matériaux du patrimoine dans l'environnement »

Cours et coordination du module UE3 : *« Altération des pierres en présence d'eau »*
Véronique VERGÈS-BELMIN (6 h)
Jean-Didier MERTZ 12 h)

Cours et coordination du module UE5 : « Méthodes de conservation des matériaux du patrimoine »

« Les matériaux pierreux en œuvre sur les monuments »
Lise LEROUX (3 h)
« Dégradation et protection des métaux dans leur environnement »
Annick TEXIER (3 h)
« Les bétons dans les monuments historiques »
Élisabeth MARIE-VICTOIRE (3,5 h)
« La technique du vitrail - L'altération des vitraux - La conservation-restauration »
Claudine LOISEL (3 h)
« Le bois en conservation-restauration »
Emmanuel MAURIN (2 h)
« Le dessalement de la pierre »
Véronique VERGÈS-BELMIN (1 h 30)

École d'architecture de Paris-Malaquais

« Des grains à la conservation de l'architecture en terre crue »
Ann BOURGÈS (3h)

École nationale des Ponts-et-Chaussées – master génie civil

« Des grains à la conservation de l'architecture en terre crue »
Ann BOURGÈS (3h)

UNIVERSITÉ DE RENNES
Master restauration et réhabilitation du patrimoine bâti

« Pathologies et restauration des bétons anciens »
Élisabeth MARIE-VICTOIRE (4 h)
« Les métaux dans les monuments historiques »
Annick TEXIER (4 h)

UNIVERSITÉ DE NANTES
Master Archéologie et Histoire

«LARMOR BADEN (56, Morbihan) Cairn de Gavrinis - Analyse des couleurs, Constat d'état
Analyse des altérations, Impact des visiteurs sur le climat »
Véronique VERGÈS-BELMIN (1h)

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE CÉRAMIQUE INDUSTRIELLE (ENSCI) (Limoges)

«*Méthodes analytiques pour la caractérisation des matériaux du patrimoine bâti, applications aux bétons et métaux anciens »*
Myriam BOUICHOU (3 h)

Organisation de stages

INSTITUT NATIONAL DU PATRIMOINE - Département des restaurateurs, formation permanente

« Quand les moisissures s'attaquent aux textiles et aux œuvres papier »
Dominique DE REYER, Faisl BOUSTA, Alexandre FRANÇOIS (2 jours)
« Méthodes simples de diagnostic pour la pierre et les mortiers »
V. VERGÈS-BELMIN, A. BOURGÈS (2 jours)

Participation à des stages de formation

Direction générale des Patrimoines - département de la formation scientifique et technique

« Gérer les risques biologiques »
Faisl BOUSTA (3h), Dominique DE REYER (3h)
« Conservation et étude des textiles »
Dominique DE REYER (1h30)

Direction régionale des affairs culturelles de Rhône-Alpes
Stage sur les ciments naturels (histoire, application, restauration) (le 18 mars 2013)
Myriam Bouichou (2 h)

3.5.3 Direction de mémoire

École du Louvre

Crespo Milena
2013/2014
Le pavillon Avicenne à la Cité universitaire de Paris ; problématique de conservation du patrimoine du XXe siècle
Isabelle Pallot-Frossard, Stéphanie Celle, personne ressource

D'Houwt Lison
2013/2014
Grandeur et vestiges du Couvent des Théatins, rue de Lille, Paris 7e
Isabelle Pallot-Frossard, Stéphanie Celle, personne ressource

Fonroques Line
2012/2013
Les sculptures monumentales religieuses en fonte en extérieur (clochers, relief naturel) en France au XIXe siècle, historique, matériaux et techniques de réalisation, problématique de conservation et de mise en valeur.
Isabelle Pallot-Frossard, Annick Texier, personne ressource

Formosa Mathilde
2012/2013
Les villas « blanches » de Le Corbusier, état des connaissances sur le traitement de la couleur
Isabelle Pallot-Frossard, Stéphanie Celle, personne ressource

Le Croller Lola
2012/2013
L'utilisation de la fonte de fer et des alliages cuivreux dans les décors extérieurs du palais Garnier à Paris
Isabelle Pallot-Frossard, Annick Texier, personne ressource

Legros Alexandra
2012/2013
Le parc du château de Saint-Cloud : l'intervention de Contant d'Ivry, sa disparition, ses vestiges actuels
Isabelle Pallot-Frossard, Stéphanie Celle, personne ressource

Loir Hermance Marie
2013/2014
Les grands magasins du Printemps, un monument historique en usage
Isabelle Pallot-Frossard

Lozach Céline
2013/2014
Comparaison des parterres d'eau des châteaux de Chantilly et de Rambouillet : création, fonction et fonctionnement, évolution, problèmes de conservation
Isabelle Pallot-Frossard, Stéphanie Celle, personne ressource

Malmezat Astrid
2012/2013
Les albâtres gypseux, problématiques d'identification, provenances, conservation.
Isabelle Pallot-Frossard, Lise Leroux, personne ressource

Manente Chiara
2012/2013
Les clefs de voute peintes du XIIIe siècle au XVIe siècle en France
Isabelle Pallot-Frossard, Vincent Detalle, personne ressource

Reyssier Pierre
2012/2013
La restauration des vitraux de la Sainte-Chapelle au XIXe siècle, un grand chantier
Isabelle Pallot-Frossard, Claudine Loisel, personne ressource

Robinson Alistair
2013/2014
La place du Palais Bourbon : le cahier des charges originel pour les immeubles, déclinaisons et transformations du type
Isabelle Pallot-Frossard, Stéphanie Celle, personne ressource

Valentini Margherita
2012/2013
Monument historique et musée, la restauration du musée Rodin à Paris
Isabelle Pallot-Frossard

Institut National du Patrimoine – dernière année

Khuskhivadze Nana
Février/juin 2014
Étude technologique, nettoyage, refixage et consolidation d'une peinture murale géorgienne déposée.
(sous la direction de Géraldine Fray, restauratrice peinture murale, INP)
Vincent Detalle

Lascourège Pauline
2012-2013
Étude technologique « 3 hommes armés de lances », collection Campana (musée du Louvre)
Vincent Detalle

Université Paris-Panthéon-Sorbonne, master Conservation-restauration des biens culturels, spécialité Vitrail

Groult Emma
Caractérisation des verres mécaniques employés en vitrail entre 1880 et 1940 : problématique d'une conservation-restauration
25/06/2013
Claudine Loisel

Mauro Alice
Synthèse sur l'utilisation des gels pour le nettoyage des vitraux
26/06/2014
Claudine Loisel

3.5.4 Participation à des jurys

CEA-ARC-Nucléart - Association des maires de France

Emmanuel Maurin, participation au concours pour la conservation et la restauration de biens culturels - majoritairement en bois - appartenant à des communes françaises, octobre 2014

École du Louvre, jury des soutenances, Master 1

Lise Leroux, rapporteur au jury de Astrid Malmezat « Les sculptures en albâtre gypseux au XVIe siècle en France : problématiques d'identification, provenance, conservation-restauration », juin 2013

Isabelle Pallot-Frossard, Dominique Martos-Levif, rapporteurs au jury de Chiara Manente « Les clefs de voûte peintes du XIIe au XVIe siècle en France », juin 2013

Dominique Martos-Levif, rapporteur au jury de Élise Riant « conservation préventive des peintures murales dans les églises », juin 2014

Institut national du Patrimoine

Département des restaurateurs, jury du concours d'entrée

Vincent Detalle, membre du jury

Département des restaurateurs, jury des mémoires, spécialité Arts du feu

Ann Bourgès, rapporteur scientifique au jury de Carole Nebout « Beauté du soir : conservation-restauration d'une céramique de type Cizhou, Chine, dynastie des Song (Xe-XIIIe siècles), Musée Cernuschi, Musée des arts de l'Asie de la Ville de Paris : impact du moulage au silicone sur les pâtes céramique », septembre 2013

Département des restaurateurs, jury des mémoires, spécialité Peinture

Ann Bourgès, rapporteur scientifique au jury de Stanislav Khashimov « Made in China : étude et restauration de fragments de peinture murale de Chine septentrionale (XIIIe-XIVe siècles), musée Guimet, Paris : mise au point d'un enduit à base de terre compatible avec les matériaux originaux pour consolidation et remontage de l'œuvre », septembre 2014

Ministère de la Culture et de la Communication

Élisabeth Marie-Victoire, membre du jury de l'examen professionnel des ingénieurs de recherche hors classe

Université Paris-Est Marne-la-Vallée

Stéphanie Touron, membre du jury de recrutement pour un poste d'ingénieur de recherche « Sciences des matériaux/caractérisation », septembre 2014

Université Paris 7 - Denis Diderot, Master sciences et génie de l'environnement, spécialité matériaux du patrimoine bâti et culturel dans l'environnement (MAPE)

Henrico Alphonse, « Étude de l'altération du calcaire de Saint-Maximin dans le bâti : expériences de simulation en laboratoire », juin 2014

Stéphanie Touron, rapporteur

Université Versailles-Saint-Quentin, Master 1 « Histoire culturelle et sociale de l'Antiquité au monde contemporain »

Lise Leroux, rapporteur au jury de Estelle Saint-Omer « Les sculptures d'albâtre en Île-de-France et Champagne, XIVe siècle – Début XVe siècle », juillet 2013

Université Versailles-Saint-Quentin, Master 2 « Histoire culturelle et sociale de l'Antiquité au monde contemporain »

Lise Leroux, rapporteur au jury de Estelle Saint-Omer « Identification et provenance des sculptures d'albâtre produites en Ile-de-France ou en Champagne -XIVe – début XVIe siècle », juin 2014

Thèse de doctorat, Université de Cergy, Laboratoire Géosciences et Environnement GEC

Thèse soutenue par Mélanie Denecker le 18 juin 2014 « Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti : méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale »

Ann Bourgès, co-directrice

Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Laboratoire chrono-environnement

Thèse soutenue par Fabien Borderie le 14 novembre 2014 « Utilisation du rayonnement UVC biocide comme alternative aux traitements chimiques dans le contrôle et l'éradication des micro-algues, cyanobactéries et champignons contaminants des milieux obscurs »

Stéphanie Touron, examinateur ; Isabelle Pallot-Frossard, membre invité

Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (UPMC) – Paris 6, ED 397

Thèse soutenue par Myrtille Hunault le 29 septembre 2014 « Rôle des éléments de transition (Co, Cu) dans la coloration des verres. Application aux vitraux du Moyen Âge »

Claudine Loisel, Isabelle Pallot-Frossard

3.5.5 Accueil de stagiaires et d'étudiants

DOCUMENTATION *Élise LEBOUCHER*	**PALLOT Timothée** ESIEE – 1re année – Stage ouvrier Juillet 2014 *Mise à jour du site web du LRMH*
GROTTES ORNÉES *Stéphanie TOURON*	**GIBEAUX Soizic** UPEC – Université Paris-Est-Créteil - MAPE Janvier/juillet 2013 État sanitaire et identification des supports rocheux et pigments mayas du Guatemala, Salvador et Honduras. Bilan du suivi climatique de la caverne du Dragon (Aisne).
GROTTES ORNÉES/ PEINTURES MURALES ET POLYCHROMIE *Stéphanie TOURON* *Dominique MARTOS-LEVIF*	**DUROUX Morgane** Université Sorbonne Paris I – Master 1 en conservation-restauration des biens culturels Janvier/mai 2013 Évaluation de la faisabilité de la consolidation de peintures mayas avec des nano-chaux en contexte de grottes.
MICROBIOLOGIE *Faisl BOUSTA*	**ROBERT Fabienne** Pôle emploi – Évaluation en milieu de travail 13/31 janvier 2014
	GAVARRE Alexandre Université de Cergy-Pontoise – Master de recherche en microbiologie Janvier/juin 2013 *Caractérisation de la colonisation microbienne d'un monument historique avec sa détérioration*
	LEMOIGNE Théo Université Pierre et Marie Curie – Paris 6 – Licence Sciences et technologie « biologie-santé-environnement » Février/juillet 2014 *Utilisation des biopolymères d'origine fongique pour améliorer les propriétés physiques et chimiques de la terre crue.*
PEINTURES MURALES ET POLYCHROMIE *«Responsable»*	**FAIN Brandon** Programme américain (université de Michigan) : Optics int the city of light, IREU – licence Juin/juillet 2013 *Évaluation de traitement du signal (Standard Normal Variate) pour l'étude stratigraphique des peintures murales en LIBS*
	HENDRUS Chelsea Programme américain (université de Michigan) : Optics int the city of light, IREU – licence Juin/juillet 2013 *Le térahertz appliqué au patrimoine culturel, étude de cas sur les peintures murales de la chapelle sainte Marie de Châālis.*
	KHUSKHIVADZE Nana Institut National du Patrimoine – dernière année Février/juin 2014 *Étude technologique, nettoyage, refixage et consolidation d'une peinture murale géorgienne déposée.* (sous la direction de Géraldine Fray, restauratrice peinture murale, INP)
	«Stagiaire» *Caractérisation et mesures d'épaisseurs de vernis par la technique LIBS.*
	OGIEN Jonas Institut d'optique – École d'ingénieur Stage de 2e année Avril/Juillet 2013 *Étude et caractérisation de peintures murales par photographies sous rayonnement ultraviolet.*

	PARISSE Silène Université Michel de Montaigne – Bordeaux 3 – Master 2 – Recherche des matériaux du patrimoine culturel et archéométrique. Février/juillet 2014 *Analyse par Libs des produits de conservation et des liants de peintures murales, comparaison avec FTIR, détermination des limites de détection des différentes méthodes analytiques*
Elsa BOURGUIGNON	**CISOTTO Alaina** SUPSI (université des arts et des sciences appliquées de suisse italienne) - licence Juin/août 2013 *Évaluation physico-chimique de nouveaux consolidants sur des peintures murales développés dans le cadre du programme européen Nanomatch.*
Didier BRISSAUD	**LEMERAND Raphaël** Collège de Thelle 28/01 au 02/02/2013 *Stage d'observation 3e*
PIERRE *Ann BOURGÈS*	**TIENNOT Mathilde** École du Louvre – 1er cycle – 3e année (stage sous couvert du C2RMF) Janvier/Juin 2013 *Caractérisation physico-chimique et mécanique de mélanges argileux.*
Lise LEROUX	**MALMEZAT Astrid** École du Louvre – 2e cycle – 1re année Novembre 2012 - juin 2013 *Les sculptures en albâtre gypseux au XVIe siècle en France – Problématiques d'identification, provenance, conservation-restauration* (sous la direction de Geneviève BRESC, Département des sculptures du musée du Louvre – personne ressource)
	SAINT-OMER Estelle Janvier 2013 - juillet 2013 Université Versailles-Saint-Quentin, master 1 « Histoire culturelle et sociale de l'Antiquité au monde contemporain » *Les sculptures d'albâtre en Île-de-France et Champagne, XIVe siècle – Début XVe siècle* (co-encadrement– étudiante accueillie par le Département des sculptures du musée du Louvre)
	SAINT-OMER Estelle Université Versailles-Saint-Quentin, master 2 « Histoire culturelle et sociale de l'Antiquité au monde contemporain » Septembre 2013 - juin 2014 *Identification et provenance des sculptures d'albâtre produites en Ile-de-France ou en Champagne -XIVe – début XVIe siècle* (co-encadrement – étudiante accueillie par le Département des sculptures du Musée du Louvre)
Véronique VERGÈS-BELMIN	**SMITTARELLO Delphine** École normale supérieure – Licence 3 – Département géosciences 24 juin au 19 juillet 2013 – (1 jour par semaine)
VITRAIL *Claudine LOISEL*	**GROULT Emma** Université Sorbonne Paris I – Master 2 en conservation-restauration des biens culturels Janvier-Mai 2013 *Les vitraux Art déco : terminologie et typologie des verres imprimés*
	MAURO Alice Université Sorbonne Paris I – Master 2 en conservation-restauration des biens culturels Octobre 2012-Janvier 2013 *Synthèse sur l'utilisation des gels pour le nettoyage des vitraux*
DIRECTION *Stéphanie CELLE*	**FOTY Maya** RMHF Fellow 2013 – Pris Richard Morris Hunt Fellowship *Stage d'observation - découverte*

3.6 Diffusion de l'information

Diffusion médias/grand public

- Lettre d'information du LRMH, lettre électronique

- Participation au salon du Patrimoine – 7 au 9 novembre 2013

3.7 Formation permanente

Séminaires – Colloques

Séminaire de recherche sur les carrières et la construction ». 5 décembre 2012, 23 janvier, 6 février, 17 avril, 15 mai, 9 octobre, 6 et 20 novembre, et 18 décembre 2013, 8 janvier, 19 mars et 5 avril 2014, Université Pierre et Marie Curie - Paris (75)
Organisation : LAMOP- UMR 8589
Lise LEROUX

Journées d'étude « Le Patrimoine, ça déménage ». 14-15 mai 2013, Cité de l'architecture et du patrimoine, Paris (75).
Organisation : Direction générale des Patrimoines, groupe de travail transversal "Conservation-restauration", coordination : département du pilotage de la recherche et de la politique scientifique
Véronique DIGNAC

E-MRS Spring meeting. 26-27 mai 2013, Strasbourg (67).
Organisation : European materials research society (E-MRS)
Vincent DETALLE

Strains induced by phase changes in deformable porous solids: what about building materials? 8-9 juillet 2013, Champs-sur-Marne (77),
Organisation : École nationale des Ponts-et-Chaussées
Ann BOURGÈS
Jean-Didier MERTZ

Colloque international Art rupestre, territoires et sociétés. 25-27 septembre 2013, Eyzies-de-Tayac (Les) (24).
Organisation : Institut national du patrimoine
Isabelle PALLOT-FROSSARD, présidente de séance « Quelles protections pour les sites d'art rupestre ? »
Faisl BOUSTA,
Stéphanie TOURON

Les sciences de la conservation du patrimoine et le développement durable: acquis, recherche, innovation. 23-25 octobre 2013, Bibliothèque nationale de France, Paris (75)
Organisation : Centre de recherche et conservation des collections (CRCC)
Élise LEBOUCHER
Lise LEROUX

Colloque Sciences et Patrimoine culturel – 14 février 2014- Université Pierre et Marie Curie - Paris (75)
Organisation : PRES Sorbonne Universités
Lise LEROUX

Des métadonnées pour les images numériques du patrimoine culturel. 13 octobre 2014, INHA, Paris (75)
Organisation : CNRS/INHA/ArScAn-UMR 7041
Élise LEBOUCHER
Cheikh NIANG
Olivier MALAVERGNE

2e Rencontres de la peinture anti-corrosion. 11 avril 2014, Rungis (94)
Organisation : CEFRACOR
Élisabeth MARIE-VICTOIRE,
Annick TEXIER

27th International colloquium, York (Grande-Bretagne), Tempest Anderson hall of the Yorkshire museum. 7-11 juillet 2014
Organisation : Corpus vitrearum
Claudine LOISEL,
Fanny BAUCHAU

Autres stages

Windows 7 professionnel, support et administration
Indigo
Didier BRISSAUD

Gestionnaires de proximité congés maladie
Gestion des subventions
Les fondamentaux de la fonction financière de l'État
Carte Agent
Plate-forme des achats de l'État
Chorus formation initiale : Restitutions service prescripteur
Prévention et résolution des conflits
Bérangère RASPAUT

Patrimoine mondial de l'UNESCO
Prévention et résolution des conflits
Stéphanie CELLE

Méthodologie pour se préparer à l'oral - TR CE et IR hors classe
Mikaël GUIAVARC'H

Photoshop niveau 1
Éva STELLA-MORAGUES

Méthodologie pour se préparer à l'oral (accès au grade d'adjoint administratif de 1er classe)
Stéphanie NOVINCE

3.8 Équipement informatique documentaire

1999	**1 Juke Box Plasmon 480 CDS**	*Unité de stockage de données sur CD-Rom*
2002	**1 Serveur Dell Power EDGE 1400 P1,2 GhZ/256 Mo/1860**	*Passerelle réseau documentation <--> réseau bureautique*
2007	**2 Serveurs Sun U20 (Serveur Web : www.lrmh.culture.fr)** **1 NAS 2Go**	*Serveur de fichiers de grande capacité pour les images + serveur web du laboratoire à Saint-Cyr (DSI)* *Unité d'archivage secondaire*
2010	**NAS N8800 Thécus 16 To**	*Archivage des images et sauvegardes*
2011	**Serveur HP Proliant DL 360 G6** **Numériseur A3 Plustek**	*Consolidation de tous les services documentaires répartis précédemment sur 3 serveurs* *Numérisation des rapports et publications*
2012	**KVM Omniview Belkin PRO3**	*Concentration de consoles des serveurs*
2013	**NAS Synology 20 To**	*Unité d'archivage secondaire*

3.9 Équipement – Méthodes d'analyse

1968	Matériel pour préparation des lames minces, modifié, complété en 1992 – 1994 *[lames minces pour pierre, métaux, verre]*
1970	Microscope ZEISS + système prise de vues : *études coupes stratigraphiques*
1978	Spectromètre UV-visible : *analyses colorants, spectres de transmission des verres*
1980	Caméra thermovision infrarouge : *diagnostic* in situ *de certains problèmes climatologiques*
1983	Appareil à mesure de corrosion : *vitesse de corrosion par analyse potentiométrique*
1984	Dynamomètre : *mesures résistances mécaniques*
1987	Chromamètre + calculateur : *analyses trichromatiques des couleurs*
1988	Complément dynamomètre : *mesures de résistance des verres et métaux - Mesures de résistance des pierres*
1989	Banc de montage vidéo : *montage de films vidéo*
1992	Spectromètre IRTF - Microscope IR + station de traitement de données : *analyses de structures organiques et minérales*
	Microtome : *préparation d'échantillons pour IRTF*
	Enceinte à vieillissement climatique : *simulation*
	Appareil à point critique : *observations au MEB de micro-organismes*
	Microscope + système de prise de vues : *observations et prises de vues microscopiques*
1993	Spectrophotomètre de fluorescence X : *analyses élémentaires*
1994	Enceinte à corrosion SO_2 : *essais de corrosion*
	Caméra et moniteur vidéo Betacam : *documentation, information, enseignements*
	Spectrocolorimètre : *analyses trichromatiques et spectrométriques des couleurs*
1995	Chromatographe en phase gazeuse, couplé à spectromètre de masse : *analyses organiques*
1996	Chromatographe en phase liquide : *analyses organiques*
1997	Microscope LEICA + système prise de vues pour microscope LEICA + caméra vidéo + moniteur couleur pour LEICA : *études coupes stratigraphiques et prises de vues*
1998	2 microscopes stéréoscopiques LEICA : *études prélèvements*
	Diffractomètre SIEMENS : *études cristallographiques*
1999	Banc de montage vidéo numérique : *montage de film vidéo*
	Sonde EDS ISIS : *analyses EDS couplées au MEB*
2000	Microscope électronique à balayage, à pression variable : *observations, photographies et analyses des microstructures*
2001	Calcimètre : *mesures de teneur en CO_2*
	Étuve de croissance : *culture d'algues*
	Bain thermostaté : *culture bactérienne*
	Potentiostat/Galvanostat : *mesures de corrosion des métaux*
	Appareil à ultrasons : *mesures de la vitesse du son*
2002	Refroidisseur : *fonctionnement du microscope électronique à balayage*
	Microfocus : *accessoires IRTF*
	Système de loupe KS : *observations et prélèvements*
	Détecteur acoustique Symphonie capteurs + logiciels : *détection acoustique*
	Chromatographie ionique : *analyses de sels solubles*
2003	Appareil de mesure de la résistance au percement : *mesures* in situ *de la résistance mécanique des pierres*
	Appareil de mesure de la vitesse de corrosion des fers : *mesures de la corrosion des fers dans le béton*
	Métalliseur au carbone : *préparation d'échantillons pour le MEB*
	Scie à fil diamanté horizontale avec table micro métrique : *préparation de coupes stratigraphiques*
	Microscope stéréoscopique MZ 16 avec objectif planapo de grossissement 2.0, série M : *observations*

	d'échantillons
	Caméra digitale couleur DC 200 : *observations d'échantillons*
	Malaxeur normalisé et table vibrante : *préparation d'échantillons de béton et mortiers*
2004	Laser + spectromètre pour LIBS : *méthodes d'analyses élémentaires*
	Oscilloscope : *caractérisation de signaux*
	Colorimètre : *mesure des couleurs*
	Potentiostat : *mesures de la corrosion des métaux*
2005	Tube à rayons X à anode en cobalt pour la DRX : *analyses des minéraux*
	Juke-box de DVD-Rom : *archivage photos numérisées*
	Hotte aspirante : *analyses de sels*
	Étuve stérilisation à chaud : *préparation d'échantillons*
	Adaptation sur enceinte climatique d'une gestion par ordinateur intégré : *mesures de vieillissement*
	Caméra Topview 3 : *observations d'échantillons*
2006	Porosimètre à mercure : *analyses de la porosimétrie*
	Remplacement du détecteur de la DRX : *analyses des minéraux*
	Équipement du microscope ZEISS en contraste de phase : *observations d'échantillons*
	Remplacement d'une loupe binoculaire : *observations d'échantillons*
	Équipement numérique pour le microscope ZEISS et de la loupe binoculaire (caméra + logiciel + carte) : *observations et prises de vues d'échantillons*
	Platine universelle LU4 adaptable sur le microscope JENAPOL : *mesures de variation de température*
	Centrale d'acquisition multivoies : *détermination des axes cristallographiques*
	Profomètre : *mesures d'enrobages des fers à béton*
	Labwiew, logiciel pour le LIBS : *mise à jour logiciel LIBS*
	Plongeur de consistance et table d'écoulement : *rhéologie de compresses de dessalement*
	Optique poli-capillaire pour la micro-diffraction : *analyses structurales DRX - En dépôt au C2RMF*
	Système d'analyse multi-canal pour la détection de rayons X : *analyses structurales DRX - En dépôt au C2RMF*
	Goniomètre pour le positionnement des échantillons : *analyses structurales DRX - En dépôt au C2RMF*
2007	Portiques : *vieillissement naturel d'échantillons*
	Compactus : *archivages des échantillons de pierre*
	Enceinte climatique : *mesures de vieillissement*
	Détecteur par la chromatographie : *analyses de composés organiques*
2008	Caméra thermographique infra-rouge : *caractérisations de l'altération de certains supports*
	Détecteur Lynxe Eye pour le diffractomètre D8 Advance : *analyses de substances cristallisées*
2009	Rugosimètre : *caractérisations de surface*
	Spectro-photo-colorimètre : *analyses* in situ
	Microbalance : *préparation échantillons pour HPLC*
2010	Système d'analyse IRTF avec spectromètre SP100 et microscope Spot Light avec Micro ATR : *analyses des composés organiques et de certains composés minéraux*
2011	Système d'identification semi automatisé des micro-organismes : *base de données importante avec un peu plus de 1 226 espèces bactériennes (Gram+, Gram- et Anaérobies) et 885 espèces de champignons.*
	Équipement AU2000 de mesure de vitesse du son : *mesures en laboratoire et sur site*
	Appareil de mesure non destructive de module d'élasticité dynamique : *évaluation de la fréquence de l'onde de vibration résultant d'une excitation mécanique simple*
	Platine rugosimètre : *cartographie automatisée complète des échantillons*
	Platine LIBS : *automatisation des déplacements d'échantillons, analyses en profil et en cartographie*
	Sonde EasyLIBS : *mesures LIBS sur site*

2012	Fluorescence X portable : ***analyses non invasives sur site***
	Enceinte climatique d'essais en température Type VCL 4006 : *essais de vieillissement artificiels de matériaux*
	Tronçonneuse manuelle : *découpe d'échantillons*
	Véhicule de service FORD
2013	Polisseuse automatique : *équipement pour la préparation automatique d'échantillons*
	Drilling resistance measurement system : *système de mesure de la résistance au percement*
	Ensemble de capteurs de diagnostics de corrosion : *ensemble de capteurs à noyer dans le béton armé associé à un système d'acquisition*
	Rodeuse de paillasse : *équipement pour la préparation automatiques des lames minces*
2014	Véhicule de service RENAULT
	Analyseur gravimétrique de sorption de vapeur d'eau : *mesure automatisée d'isothermes*
	Microscope 3D VHX 500 : *observation d'échantillons divers en 3D*